

**Determinación de la influencia de las características químicas de los agregados  
reciclados de concreto como llenante en concretos hidráulicos y asfálticos**

**Ricardo Gabriel Lagares Espinoza**

**Universidad del Norte**

**División de Ingenierías**

**Departamento de ingeniería Civil y Ambiental**

**Maestría en ingeniería Ambiental**

**Barranquilla, Atlántico, Colombia**

**2017**

Copyright © 2017 por Ricardo Lagares Espinoza. Todos los derechos reservados.

**Determinación de la influencia de las características químicas de los agregados  
reciclados de concreto como llenante en concretos hidráulicos y asfálticos.**

**Ricardo Gabriel Lagares Espinoza,**

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de Magister en  
ingeniería Ambiental.

Director

**Dr. Ing. Carlos Pacheco**

Codirectora

**MSc. Ana Fonseca**

**Universidad del Norte**

**División de Ingenierías.**

**Departamento de ingeniería Civil y Ambiental**

**Maestría en ingeniería Ambiental**

**Barranquilla, Atlántico, Colombia**

**2017**

**Nota de aceptación.**

---

V. ° B. ° del Director.

**Dr. Ing. Carlos Pacheco**

División de Ingenierías

Departamento de ingeniería Civil y Ambiental

Universidad del Norte.

---

V. ° B. ° del Director.

**MSc. Ana Fonseca**

División de Ingenierías

Departamento de ingeniería Mecánica

Universidad del Norte.

Barranquilla, Atlántico, Colombia, Agosto de 2017

**Nota de aprobación.**

---

V. ° B. ° del Jurado.

**MSc. Edgar Cote Sánchez**

División de Ingenierías

Departamento de ingeniería Civil y Ambiental

Universidad del Norte.

---

V. ° B. ° del Jurado.

**MSc. Julián Yepes**

División de Ingenierías

Departamento de ingeniería Mecánica

Universidad del Norte.

Barranquilla, Atlántico, Colombia, Agosto de 2017

**Dedicatoria.**

*Este trabajo va dedicado a las nuevas generaciones, las cuales tienen el reto de contribuir cada vez más al mejoramiento del ambiente de la siguiente generación. Por eso espero que este aporte contribuya a la aplicación de mejores modelos de sostenibilidad económica-ambiental.*

## **Agradecimientos**

- A mi madre, y mi padre que siempre me han dado su apoyo de forma incondicional, quienes han estado en todo momento, les agradezco su apoyo, la motivación que me han dado, los consejos y educación que han sido las guías en mi vida.
- Al profesor Carlos Pacheco por sus consejos, por la atención y gran apoyo que me ha brindado durante la carrera, ha sido un gran guía en mi desarrollo profesional y para el desarrollo de este proyecto.
- A la profesora Ana Fonseca, por su gestión, guía y consejos para el desarrollo del proyecto.
- A la Profesora Yaneth Pineda y al Instituto para la Investigación y la Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por su colaboración con los ensayos de FRX en los materiales.
- Al proyecto Desarrollo de una Metodología de Diseño de Mezclas Asfálticas Tibias con la Inclusión de Materiales Pétreos Provenientes de Concretos Reciclados de la Universidad del Norte por proveer el soporte económico y muestras para el desarrollo del proyecto.
- Al personal de los laboratorios de ambiental y laboratorio geotécnica y suelos de la Universidad del Norte que fueron de gran apoyo durante la aplicación de las pruebas.

## Resumen

En el presente documento se analizaron las propiedades de los agregados reciclados de concreto obtenidos de la demolición de una vía de alto tráfico, una edificación y un agregado natural en relación a la dependencia con el tamaño, mediante diferentes técnicas como: la composición química mediante análisis de espectrometría de dispersión de energía de rayos x (EDX), el contenido de materia orgánica correlacionado mediante el análisis de pérdidas por ignición a 550 °C, el contenido de carbonatos y agua hidratada mediante pérdidas por ignición a 1000 °C, el pH mediante análisis potenciométrico en agua, la conductividad eléctrica mediante análisis conductivimétrico y la humedad superficial mediante pérdida de peso por secado a 110°C.

Se encontró que los agregados reciclados presentan valores de humedad mayores a los agregados naturales además de un mayor contenido de óxidos calcio, y valores de pH altos que lo ubican como un material básico alcalino con posibilidad de utilizarse en concretos hidráulicos y pavimentos asfálticos dado que estas características permiten una buena adhesión en la interface agregado–asfalto. El análisis de conductividad ubica a esos materiales como fuertemente salinos con una conductividad eléctrica alta y muy baja resistividad eléctrica lo cual resulta beneficioso en aplicaciones donde es necesario el manejo de cargas eléctricas a través de estos materiales.



## Tabla de contenido

Resumen .....	VIII
1. Introducción.....	1
2. Enfoque del proyecto.....	4
3. Objetivos.....	5
3.1 Objetivos generales .....	5
3.2 Objetivos específicos.....	5
4. Planteamiento del problema. ....	6
5. Antecedentes.....	8
6. Marco Teórico .....	12
6.1 Agregados reciclados de concreto .....	12
6.1.1 Producción de agregados reciclados.....	13
6.1.2 Características de los agregados reciclados de concreto. ....	15
6.2 Características de los agregados naturales. ....	26
6.2.1 Propiedades de los agregados. ....	30
6.2.2 Sustancias perjudiciales en los agregados. ....	30
6.2.3 Características de agregados naturales en el Atlántico.....	31
6.3 Características del cemento Portland.....	34
6.3.1 Composición química del cemento. ....	36
6.4 Técnicas de análisis utilizadas en la caracterización del proyecto. ....	41

6.4.1 Espectrometría de rayos X.....	41
6.4.2 Determinación de porcentaje en masa de impurezas orgánicas mediante Loss Of Ignition (LOI).....	44
6.4.3 Determinación de humedad superficial. ....	47
6.4.4 Determinación de pH.....	49
6.4.5 Determinación de la conductividad eléctrica. ....	50
7. Metodología, resultados, análisis y conclusiones.....	51
7.1 Metodología.....	51
7.1.1 Recolección, selección y preparación de muestras.....	51
7.1.2 Diseño de experimento .....	54
7.1.3 Parámetros para la caracterización. ....	56
7.1.4 Análisis considerados. ....	57
7.2 Presentación de los resultados .....	66
7.2.1 Espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRFS).....	66
7.2.2 Humedad superficial.....	78
7.2.3 Determinación de porcentaje en masa de impurezas orgánicas mediante Loss Of Ignition (LOI 550°C) .....	79
7.2.4 Determinación de porcentaje en masa de carbón inorgánico mediante Loss Of Ignition (LOI 1000°C) .....	81
7.2.5 Determinación de pH.....	83

7.2.6 Determinación de conductividad.....	84
7.3 Análisis de los resultados. ....	85
8. Conclusiones.....	88
8.1 Agregado de concreto reciclado de edificación.....	88
8.2 Agregados de concreto reciclado de vías. ....	95
9. Recomendaciones.....	103
Lista de referencias.....	106

## Índice de tablas

Tabla 1 Análisis de la composición química de las gravas de los agregados reciclados utilizando FRX para los 4 óxidos principales, Silicio, Calcio, Aluminio y Hierro. ....	19
Tabla 2 análisis de la composición química de los finos de los agregados reciclados utilizando FRX para los 4 óxidos principales, silicio, calcio, aluminio y hierro. ....	21
Tabla 3 Porcentaje de pérdidas por ignición para diferentes gravas de agregados reciclados. ....	23
Tabla 4 Porcentaje de pérdidas por ignición para diferentes finos de agregados reciclados ....	24
Tabla 5 clasificación de rocas sedimentarias según agente geológico externo. tomada de (Sánchez de Guzman, 2001) .....	27
Tabla 6 Clasificación de los depósitos de rocas sedimentarias (Sánchez de Guzman, 2001) .....	27
Tabla 7 Clasificación de agregados naturales según tipo de roca. Fuente EN BS-812-75 .	29
Tabla 8 Fuentes de materiales en el departamento del Atlántico (Moreno Rodriguez & Buzon Ojeda, 2009).....	32
Tabla 9 Propiedades físicas de agregados extraídos de las canteras del departamento del Atlántico (Moreno Rodriguez & Buzon Ojeda, 2009).....	33
Tabla 10 Cambios de la materia prima ocurridos durante el proceso de clinkerización dentro de un horno (Sánchez de Guzman, 2001). ....	35
Tabla 11 Formulas químicas de óxidos más frecuentes en cementos y sus abreviaturas.(Neville & Brooks, 1998; Sánchez de Guzman, 2001) .....	37

Tabla 12 Compuestos más comunes del cemento y sus abreviaturas.(Neville & Brooks, 1998) .....	37
Tabla 13 Composición aproximada de óxidos del cemento portland (Neville & Brooks, 1998) .....	39
Tabla 14 Proporciones aproximadas de los compuestos del cemento portland.(Neville & Brooks, 1998) y contenido relativo en porcentaje de los compuestos principales calculado por método de Bogue del cemento en Colombia.(Sánchez de Guzman, 2001) .....	39
Tabla 15 Composición promedio de los óxidos presentes y otros compuestos dentro del cementos en Colombia.(Sánchez de Guzman, 2001).....	39
Tabla 20 Diseño de experimento, en este diseño se analiza cada rango de tamaños del agregado tomando como referente los tamices indicados por la metodología de la MDC-25, estos análisis se aplican a 3 muestras de cada rango de tamaños de cada material. ....	54
Tabla 17 Franja Granulométrica DMC-25 .....	55
Tabla 22 Metodologías de ensayo. ....	57
Tabla 19 Composición química obtenida mediante FRX de ACRE, ACRV y NA expresado en forma de óxidos en %(p/p).....	67

## Índice de gráficos

Grafico 1 Franja Granulométrica MDC-25 .....	55
Gráfico 2 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de aluminio (alúmina, $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN .....	68
Gráfico 3 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de silicio (sílice, $\text{SiO}_2$ ) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN .....	69
Gráfico 4 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de calcio (cal, $\text{CaO}$ ) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN .....	70
Gráfico 5 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN .....	71
Gráfico 6 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN .....	72
Gráfico 7 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de magnesio (Magnesia, $\text{MgO}$ ) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN .....	73
Gráfico 8 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN .....	74

Gráfico 9 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de potasio ( $K_2O$ ) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN ..... 75

Gráfico 10 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de titanio ( $TiO_2$ ) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN ..... 76

Gráfico 11 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de Manganeso ( $MnO$ ) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN ..... 77

Gráfico 12 Resultados de ensayo de humedad superficial llevados a cabo mediante el método ASTM D 2216-10 (Método A), a los agregados reciclados de concreto de edificación (ARCE), vías (ARCV) y el agregado natural (AN). ..... 78

Gráfico 13 Resultados de ensayo de porcentaje de pérdidas por ignición (Loss On Ignition) a  $550^{\circ}C$ , utilizando la metodología utilizada por Dean, 1974; Limbachiya et al., 2007 en agregados reciclados de concreto de edificación (ARCE), vías (ARCV) y el agregado natural (AN). ..... 79

Gráfico 14 Resultados de ensayo de porcentaje de Loss On Ignition a  $1000^{\circ}C$  llevados a cabo mediante la metodología utilizada por Dean, 1974; Limbachiya et al., 2007, en agregados reciclados de concreto de edificación (ARCE), vías (ARCV) y el agregado natural (AN). ..... 81

Gráfico 15 Resultados de ensayo de pH llevados a cabo mediante el método NTC 5264–2008, a los agregados reciclados de concreto de edificación (ARCE), vías (ARCV) y el agregado natural (AN). ..... 83

Gráfico 16 Resultados de ensayo de Conductividad Eléctrica llevados a cabo mediante el método NTC 5596–2008 (Método A), a los agregados reciclados de concreto de edificación (ARCE), vías (ARCV) y el agregado natural (AN).....	84
---	----



## **1. Introducción.**

El desarrollo trae consigo efectos en el ambiente, y la industria de la construcción es una de las que mayor impactos al medio ambiente genera (Silva, de Brito, & Dhir, 2017). Cada año, millones de toneladas de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) son generados y gran parte de estos terminan en rellenos sanitarios. Esta inadecuada disposición ha generado una preocupación a nivel mundial, ocasionando que se realice un seguimiento a la producción de los mismos. La Unión Europea produce entre 120 y 180 millones de toneladas anuales, Estados Unidos de 120 a 200 millones de toneladas anuales, y China de 120 a 160 millones de toneladas anuales (Kleijer, Lasvaux, Citherlet, & Viviani, 2017; Radonjanin, Malešev, Marinković, & Al Maly, 2013; Silva et al., 2017).

Varios investigadores destacan el importante aporte de la industria de la construcción a la generación de gases contaminantes, siendo esta responsable de aproximadamente entre el 40% al 50% de las emisiones de efecto invernadero en el mundo (Kleijer et al., 2017; Vieira, Calmon, & Coelho, 2016). Debido al impacto que generan los RCD en el mundo, y a su poca reutilización y reintroducción a un ciclo de vida útil, este termina ocupando espacio en rellenos sanitarios o como relleno de vías en el mejor de los casos; en los últimos años se han buscado aplicaciones que permitan darles una nueva vida útil y expansión del ciclo de vida de estos materiales de construcción.

Hace cerca de 50 años que se investigan diferentes alternativas para incluir los RCD nuevamente a la construcción como materiales origen (agregados pétreos o nuevos materiales). Estas investigaciones se enfocan principalmente en la generación de nuevas mezclas de concreto

estructural, pavimentos y construcciones de poca carga, o concretos de calidad más baja que el concreto estructural (prefabricados) (Bui, Satomi, & Takahashi, 2017; de Juan & Gutiérrez, 2009; Kasai, 1988; Olorunsogo & Padayachee, 2002). De esta forma, los RCD han sido introducidos nuevamente a los procesos constructivos, que mediante la aplicación de aditivos, clasificación de los agregados reciclados y la sustitución de porcentajes de agregados naturales vírgenes se logrado obtener resistencias del concreto que cumplen con las normativas vigentes de concreto estructural (NSR 10). Sin embargo, estas mismas investigaciones han encontrado que utilizando agregados naturales para el mismo diseño de mezcla, los resultados obtenidos han sido mejores en todos los parámetros medidos (resistencia a la compresión, dureza, etc.) (Ahmadi, Farzin, Hassani, & Motamedi, 2017; Bui et al., 2017; Kasai, 1988; Santana Rangel et al., 2017).

En la actualidad, existen técnicas para comprobar la calidad de los agregados reciclados: pruebas de desgaste en máquina de los ángeles; gradación; resistencia a la compresión de los núcleos de concreto; medición de propiedades físicas y mecánicas, entre otras. Estas pruebas están basadas en las mismas técnicas utilizadas para medir la calidad de los agregados naturales, y en algunos casos suelen tomar mucho tiempo para conocer si el agregado es el indicado para una aplicación (Angulo, Ulsen, John, Kahn, & Cincotto, 2009; Rodrigues, Carvalho, Evangelista, & De Brito, 2013).

Mediante la caracterización química de los residuos de construcción y demolición (RCD) o Agregados reciclados de concreto (RCA), se puede conocer la composición de algunos compuestos elementales que estos residuos puedan poseer; esto con la finalidad de ser usados en nuevos procesos industriales nuevas técnicas de tratamiento, uso en la fabricación de nuevos materiales y productos, que permita que a través del reúso se reduzca la disposición en rellenos sanitarios y se tengan más alternativas para las aplicaciones existentes y futuras. (Angulo et al., 2009;

Limbachiya, Marrocchino, & Koulouris, 2007). Asimismo, conocer la evolución del material en el tiempo y analizar cómo lo afecta el medio en condiciones reales.

Actualmente en Colombia son nulos los reportes de investigaciones enfocadas en la química de los agregados reciclados, aun menos investigaciones en el área de concretos reciclados provenientes de la costa caribe colombiana donde las condiciones ambientales tienen gran efecto en las obras de ingeniería: vientos, humedad, salinidad del ambiente, entre otros factores incidentes.

Este trabajo se concentró en medir un grupo de propiedades químicas utilizando técnicas rápidas, que utilizan poca o ningún tipo de reactivos generando pocos desechos y producen bajo impacto ambiental. Se realizaron pruebas de pH, humedad, pérdidas por ignición para 550 °C y 1000 °C, y conductividad eléctrica, cuyo objetivo fue determinar el carácter básico o ácido de los agregados reciclados, la cantidad de agua superficial, la materia orgánica presente, carbonatos, agua hidratada y las sales contenidas respectivamente. Estos ensayos se realizaron con el fin de evaluar las características químicas de los agregados reciclados y analizar la influencia de éstas en la temprana degradación del agregado y la afectación del nuevo producto elaborado con estos agregados reciclados.

## **2. Enfoque del proyecto.**

El enfoque principal de este proyecto es proponer recomendaciones, basándose en análisis de parámetros químicos obtenidos mediante ensayos estandarizados y de la literatura científica a los agregados reciclados de una vía de alto tráfico y una edificación, localizadas ambas en la ciudad de Barranquilla, y comparándolas con las características de un agregado natural obtenido en el departamento del Atlántico. Asimismo, establecer según las características químicas y la literatura el uso potencial que estos agregados puedan tener en Colombia. Con los nuevos datos e información obtenida en este estudio se pretende aumentar la base de datos de conocimiento sobre los agregados reciclados de concreto, reducir la incertidumbre de los constructores a los agregados reciclados que permita una mayor inclusión de estos en las obras de construcción.

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivos generales**

Determinar las características químicas de un agregado de concreto reciclado de una vía de alto tráfico (avenida Hamburgo, en el corredor portuario), y de otro obtenido en una edificación (estadio de béisbol Tomás Arrieta) para establecer hipótesis de las alternativas de aplicación y su influencia como llenante en concretos hidráulicos y asfálticos.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Determinar características favorables y desfavorables de los agregados reciclados de concreto comparándolas con un agregado natural.
- Comprobar la influencia del tamaño sobre las características analizadas de los agregados.
- Constituir hipótesis de alternativas de uso de aplicaciones en ingeniería civil.
- Establecer la influencia de estos agregados reciclados de concreto como llenante en concretos hidráulicos y pavimentos asfálticos.
- Aportar información técnica actual sobre las propiedades de los agregados reciclados de concreto que permita optimizar su uso en diseños de mezcla tanto en concreto hidráulico como en concreto asfáltico.

#### **4. Planteamiento del problema.**

En las ciudades en desarrollo se observan fenómenos como el rápido aumento de la población, cambios en el consumo per cápita y las oleadas de migración, que inciden en la dinámica de la ciudad, y a su vez en el comportamiento que tendrá un relleno sanitario o el sitio para disposición final de los residuos en general (Dyson & Chang, 2005). Este aumento de la población va acompañado del cambio en la infraestructura de las ciudades, para cumplir con las necesidades específicas de las comunidades, lo que genera la necesidad de efectuar cambios, modificaciones, o reformas en las estructuras de edificaciones, aumentando la explotación de los recursos naturales, además de consumo de energía y demanda de mano de obra calificada. Solo en Europa se calcula que la industria de la construcción y demolición (C&D) aporta del 25 % al 30 % de los residuos totales generados (European Commission, 2016), en Estados Unidos se produce alrededor de 534 millones de toneladas de RCD (United States Environmental Protection Agency, 2016), mientras en China se estima se produjo en 2014 cerca de 1.13 billones de toneladas de RCD (Lu, Webster, Peng, Chen, & Zhang, 2017; Silva et al., 2017). Además, la mayor parte de la industria de la construcción y demolición está compuesta por medianas y pequeñas empresas. Estas empresas por lo general quieren realizar los trabajos de forma rápida y económica como sea posible sin preocuparse de que la mayoría de los desechos son evitables y al seguir el enfoque convencional a menudo se reducen los ingresos (Silva et al., 2017).

Otro inconveniente por el cual se genera las grandes cantidades de RCD se debe a la falta de conocimiento general en la apropiada disposición, en muchos casos, las compañías no se ven obligadas a reducir la generación de RCD o encontrar algún valor agregado en ellos, ya sea debido

a la legislación insuficiente o simplemente no existe una opción diferente a disponerlo en un relleno. (Silva et al., 2017)

La construcción de pavimentos utilizando agregados reciclados es una práctica que se ha desarrollado en los últimos años (O'Mahony & Milligan, 1991), sin embargo las características químicas de los agregados y su relación con las propiedades físicas requeridas para una perdurabilidad de la obra no han sido ampliamente estudiadas, más si se tiene en cuenta que estas características químicas varían según la zona geográfica de las que los agregados naturales han sido explotados, como también las variaciones de la composición debido a la exposición ambiental --carbonatos, sílices, óxidos de azufre, etc.-- durante el tiempo de vida de la obra. Por estas razones, surge la siguiente pregunta: ¿Podemos establecer diferencias basados en su composición química entre los agregados naturales y agregados reciclados de concreto que permitan predecir su comportamiento futuro en mezclas asfálticas y de concreto? y en algunos casos establecer si ¿Hay influencia positiva o negativa al usar estos agregados como material llenante en concretos o asfaltos usados en proyectos de ingeniería? ¿Cuál sería el impacto ambiental que pudiese generarse al reutilizar este material?

Las anteriores preguntas surgen debido a que algunos estudios recientes indican que los agregados reciclados pueden contener concentraciones pequeñas de sustancias consideradas peligrosas con lo cual podría limitar su uso por posibles problemas de resistencia o exudación química (Limbachiya et al., 2007).

## 5. Antecedentes

Desde hace varias décadas se realizan estudios con la finalidad de implementar nuevos materiales como agregados a las mezclas de concreto, ya sea con la finalidad de mejorar las propiedades, disminuir los costos y/o carga ambiental (O'Mahony & Milligan, 1991). En varios de estos estudios se comparan las propiedades de los concretos (resistencia a la compresión, dureza del material, absorción), elaborados con los agregados reciclados versus los agregados naturales, que dan a conocer la factibilidad de uso de los RCD en la conformación de concreto es viable, resultando en ocasiones mejor que al usar agregados naturales (Blengini, 2009) (Silva et al., 2017).

Algunos autores relacionan la lenta introducción de los RCD en la industria de la construcción debido al bajo costo que tiene el material natural y esto se relaciona con la falta de consideración del impacto ambiental que conlleva la extracción del mismo. En algunos casos la diferencia en costos entre el agregado reciclado (AR) y el agregado natural (AN) se da cuando las distancias de viaje entre el lugar de extracción y el lugar de construcción son alejadas, lo que aplica de igual forma para los AR cuando los lugares de tratamiento se encuentran a grandes distancias. Aunque esta complicación puede superarse en algunas obras como reparación de carreteras utilizando plantas móviles de trituración de AR (Silva et al., 2017).

Asimismo, los impedimentos logísticos que afectan la rentabilidad, se le suma la falta de confianza que genera el AR entre los constructores o clientes que no confían plenamente que las características de los AR se equiparen a las de los AN, aunque hay estudios que identifican la posibilidad de su uso en obras de alto desempeño, (Nagataki, Gokce, Saeki, & Hisada, 2004) existe la necesidad de implementar formas de separación de los AR que permitan separar entre alta y baja calidad de AR.



Varios estudios desarrollan procedimientos cuya finalidad es obtener diferentes grados de calidad de los agregados reciclados mediante una serie de operaciones unitarias que proporcionen su clasificación (Silva et al., 2017). Estas operaciones inician in situ durante la demolición selectiva de la estructura, con la clasificación de los materiales presentes, separando primero aquellos de alto valor que puedan entrar fácilmente en el mercado; luego aquellos materiales que son peligrosos, que deben retirarse por separado para evitar enviarlos a un relleno de residuos peligrosos, material que no lo es, y finalmente separar los materiales según su función estructural y en tamaños adecuados para su transporte y tratamiento (Silva et al., 2017; Zhao, Leefink, & Rotter, 2010). De esta forma se mantiene un control de la materia prima para la producción de AR que permita maximizar su calidad.

Sin embargo, esta forma de tratamiento responde a la normativa técnica utilizada para definir los parámetros de calidad de agregados naturales, estas técnicas de análisis se enfocan en las propiedades físicas y en la presencia de sustancias orgánicas que puedan degradarse u otras que puedan afectar las propiedades físicas de la estructura, algunas normas utilizadas son la UNE EN 12620:2003 en Europa, la NTC 174 en Colombia, (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC ), 2000), y para estos casos la metodología estándar de caracterización de RCD no entrega suficiente información acerca de su composición químicas y mineralógica que permita relacionar directamente el desempeño con el tipo de agregados (Angulo et al., 2009). El tratamiento que reciben los agregados reciclados en este caso aún está en investigación; Algunas empresas la certificación de los ARC se realiza utilizando las mismas normas de los AN para permitir su utilización, siempre recomendando realizar ensayos previos a su inclusión en las mezclas (Silva et al., 2017).

Los ensayos requeridos para la utilización de los AR en concretos requieren de un tiempo considerablemente alto que depende del tipo de obra a ejecutar. Si existe la necesidad de una elevada resistencia del concreto será necesario investigar si el AR cumplirá con la resistencia necesaria para la obra o por el contrario requerirá una formulación de mezcla especial (Bravo, De Brito, Pontes, & Evangelista, 2015). A pesar de que se utilizan los AR en la construcción, varios estudios indican que los AR deben ser mezclados con los AN en proporciones menores de 30%, algunas metodologías más actuales indican la posibilidad de llegar hasta un 50% (Bui et al., 2017) debido a estas conclusiones la confianza en los AR no es mucho dado que su comportamiento es difícil de predecir y su resistencia siempre está por debajo de la resistencia lograda con agregados naturales para la misma formulación de mezcla, otro inconveniente es la homogeneidad de los AR, mientras los AN provienen de grandes vetas y su calidad como producto de extracción es controlada. Para los AR se dificulta entregar un producto homogéneo por parte de las plantas de trituración y procesamiento las cuales deberán tener una disponibilidad de espacio elevada para retener el material durante ese tiempo en condiciones que preserven el AR sin afectar sus propiedades (Silva et al., 2017).

Otros autores han analizado las propiedades químicas y mineralógicas de los AR buscando encontrar relaciones con las propiedades físicas y mecánicas y de esta forma establecer los usos y las restricciones de los AR o los tratamientos necesarios para su inclusión en nuevas obras de construcción o aplicaciones de la ingeniería. Algunos ejemplos de estos estudios como los realizados por Limbachiya (2007) establece que las características químicas y mineralógicas de los AR son apropiadas para la inclusión en nuevas mezclas de concreto. Además, demuestra que las características no presentan variación significativa para muestras tomadas en los diferentes lugares de estudio. Sin embargo Angulo et al, 2009 (Angulo et al., 2009) indica que existen

variaciones en la composición para los AR en Brasil a diferencia de los estudios europeos, y a su vez establece las diferencias entre las técnicas constructivas y las diferencias significativas que tienen el uso de diferentes agregados naturales (roca ígnea en Brasil, esquisto en Inglaterra, caliza en Italia) como también de arcillas provenientes de suelo y cerámica roja en las muestras de Brasil.

Por otro lado, el efecto de la porosidad en los agregados reciclados de concreto (ARC) ha sido estudiado no solo con fines de factibilidad económica, sino también con el propósito de establecer cómo afecta estructuralmente los ARC. Zhao et al., 2010 indica que el daño que reciben las estructuras de concreto que han sido expuestas a soluciones del ion  $SO_4$  y ciclos de humedecimiento y secado es significativo cuando se utilizan incorporaciones de RCA mayores a 30% como sustituto de los AN, indicando que la presencia de micro grietas, túneles y capilares es mayor cuando se utilizan ARC en las mezclas. Igualmente, destaca que la cohesión entre el cemento y el RCA es menor que la que ocurre con los AN.

Las pruebas realizadas al material reciclado de construcción y demolición suelen determinar macroscópicamente la composición en términos de las fracciones de peso del concreto, los cerámicos o mampostería, así como de otros materiales no deseados que son retirados de forma manual como el plástico, madera o metales (Angulo et al., 2009). De igual manera, en estas propiedades se miden propiedades físicas como la densidad, fracción másica relativa a la densidad, absorción de agua así como también iones solubles de cloruros y sulfatos

## **6. Marco Teórico**

### **6.1 Agregados reciclados de concreto**

Los agregados reciclados de concreto hacen partes de los residuos de demolición de obras de construcción ya sean residenciales (casas y edificios), viales (puentes y carreteras), y obras públicas (estadios o parques). Estos materiales de demolición son ampliamente heterogéneos, en ellos se pueden encontrar residuos de cemento, tierra, concreto, mampostería, residuos orgánicos, madera, plásticos, vidrio, yeso, incluso asbestos, entre otros. Muchos de estos materiales terminan su vida útil en botaderos a cielo abierto, rellenos sanitarios, o son utilizados como material de relleno en situación muy específicas, descartando toda posibilidad de reutilización. (Silva et al., 2017). Esto genera una situación no sostenible ambientalmente, debido al espacio y contaminación que pueden generar este tipo de residuos en los suelos en los que son depositados.

Estadísticas europeas indican que 30% de los desechos que llegan a los rellenos sanitarios son residuos de construcción y demolición alrededor de 180 millones de toneladas (Radonjanin et al., 2013), en países como Estados Unidos (Franklin Associates, Prairie Village, 1998) y China (Zhao, W., & Rotter, 2008) estiman en 136 millones y 120 millones de toneladas anuales de residuos de demolición respectivamente. Estas grandes cantidades de materiales plantean un desafío importante al momento de emplearlas nuevamente en la industria de la construcción, a pesar que las propiedades mecánicas y físicas de los agregados reciclados han sido estudiadas en los últimos 50 años, son pocas las construcciones realizadas con estos materiales (Pacheco-Torgal, Faria, & Jalali, 2013).

A pesar de la extensa literatura sobre la influencia de los agregados reciclados de concreto en las propiedades de diversos materiales de construcción, los agregados utilizados, suelen ser en

su mayoría creados en laboratorio o versiones no contaminadas diferentes a la realidad. (Silva et al., 2017) Los agregados reciclados son materiales bastante heterogéneos en forma, propiedades y composición, además que pueden estar contaminados por su proceso de generación, y a pesar de ser materiales heterogéneos y de difícil aceptación en la industria de la construcción, múltiples investigadores concluyen que porcentajes de inclusión de hasta 50% de agregados reciclados en la mezcla de concreto pueden tener la misma calidad del concreto fabricado únicamente con agregados naturales vírgenes (Bravo et al., 2015).(Bui et al., 2017).

#### **6.1.1 Producción de agregados reciclados.**

Existen varias metodologías para la producción de agregados reciclados de concreto, de las cuales es posible identificar 4 etapas: demolición, transporte, clasificación, tratamiento y almacenamiento. A continuación se describen brevemente las etapas antes mencionadas.

A partir de la demolición como etapa inicial de producción de agregados reciclados, estos pueden provenir de una demolición selectiva o completa; en la primera se separan los materiales constructivos como maderas, prefabricados, concreto de columnas, concreto de paredes, tejas, etc. Este procedimiento posibilita la obtención de una mejor calidad de materiales y un mejor proceso de reciclaje. Por el contrario, en la demolición no selectiva incluye todos estos materiales y se encuentra en algunos casos residuos como asbestos, materiales metálicos, plásticos, por ende, no es un proceso adecuado o limpio para obtener agregados de calidad aceptable, lo que incrementa la contaminación de los agregados por sustancias que no benefician e incluso pueden perjudicar la calidad de la mezcla de concreto (Silva et al., 2017).

El transporte del material de demolición es una etapa determinante al momento de establecer el tamaño de la huella de carbono y el beneficio ambiental del uso de reciclados de concreto (Kleijer et al., 2017; Letelier, Tarela, Muñoz, & Moriconi, 2016; Silva et al., 2017). Autores como Kleijer et al., establecen que la máxima distancia a cubrir por los productos de demolición hasta una planta de reciclaje sea de 25 km, distancias mayores no representarían beneficios ambientales significativos. Silva et al, indica que el tratamiento in situ mediante plantas portátiles es una solución económicamente viable siempre que existe suficiente disponibilidad de desechos de construcción y demolición a costa de incrementar la producción de ruido en la zona y obtener agregados de menor calidad comparados con las plantas estacionarias.

La clasificación de los agregados permite obtener diversos materiales de reciclaje como: metales ferrosos y no ferrosos, plásticos e incluso reutilizar objetos que se perderían en la demolición cuando esta no es selectiva. De igual forma permite obtener diferentes calidades de RCA, y para esto existen diferentes metodologías que pueden aplicarse in situ durante la demolición o en planta. En este paso la calidad de los materiales dependerá no sólo de la etapa de demolición sino también del método de clasificación. Estos pueden ser manuales o mediante tecnologías de clasificación (Silva et al., 2017). Una buena clasificación de materiales permite reducir o eliminar la necesidad de tratamiento posterior de los agregados reciclados (Kleijer et al., 2017)

Tratamiento de los agregados reciclados: esta etapa está determinada por la calidad de los agregados obtenidos durante las etapas de demolición y clasificación. Al conocer la calidad de estos es posible indicar el tipo de tratamiento para mejorar sus propiedades. Bui et al., 2017 señala numerosos estudios enfocados en la calidad de los agregados cuyo propósito ha sido reducir los costos económicos y ambientales mejorando las propiedades de los ARC al cambiar las

proporciones de agua/cemento y agregar materiales puzolanicos, mientras otros estudios más actuales han intentado mejorar las propiedades de los ARC removiendo el mortero añadido mediante impactos mecánicos, calentamiento por microondas, tratamientos térmicos, soluciones acidas, tratamiento químicos y térmicos, o limpieza por ultrasonido, debido a que han identificado que la cantidad de mortero adherido afecta significativamente las propiedades de los ARC (de Juan & Gutiérrez, 2009).

El almacenamiento de los agregados reciclados es una de las etapas finales de producción y afecta los costos significativamente, dado que demanda condiciones especiales, como una baja humedad del sitio de almacenamiento para evitar la auto cementación y rehidratación de partículas de cemento que no fueron hidratadas durante el proceso de fragua e hidratación de la pasta cementante (Silva et al., 2017).

### **6.1.2 Características de los agregados reciclados de concreto.**

Los agregados reciclados de concreto pueden diferir de los agregados naturales debido a que estos están compuestos por dos materiales diferentes, agregados naturales y un mortero de cemento adherido, teniendo este último unas cualidades inferiores como baja densidad, alta absorción, abrasión de máquina de los ángeles y contenidos de sulfatos. Estas características influyen de forma negativa en el concreto reciclado, afectando las propiedades relacionadas con la tensión, contracción, elasticidad, arrastre, durabilidad (de Juan & Gutiérrez, 2009).

Al momento de medir propiedades como la absorción de los agregados reciclados, existe correlación directa entre la cantidad de mortero contenido del agregado y la absorción, de esta manera de Juan & Gutiérrez, 2009 establecen que las cantidades máximas de mortero en agregados

reciclados deben ser menores de 26% para cumplir con el parámetros de calidad de agregados naturales de 5% de absorción.

Las mediciones de desgaste evaluadas mediante máquina de Los Ángeles correlacionan de forma directa el desgaste con el contenido de mortero que limita el contenido de mortero hasta 44% debido al desgaste generado, acorde a parámetros establecidos para España (de Juan & Gutiérrez, 2009).

Y el contenido de sulfatos es mayor en los agregados reciclados debido a los sulfatos del cemento contenidos en el mortero adherido, según sea la normativa utilizada para fabricación de cementos este parámetro puede estar entre 4% y 5%,

El tamaño de los agregados al momento de la trituración influye en la cantidad de mortero, siendo los tamaños más finos aquellos con mayor cantidad de mortero adherido.(de Juan & Gutiérrez, 2009).

Otros estudios identifican el comportamiento mecánico de los agregados reciclados de concreto en nuevas mezclas de concreto, donde establecen límites de remplazo máximo de agregados naturales con agregados reciclados. Los límites sugeridos suelen estar entre 25% y 50% de remplazo, garantizando que parámetros como la comprensión en triaxial cumplan con valores de 25MPa y 65MPa.(Santana Rangel et al., 2017) y hasta 50% de remplazo de AN en pruebas de corte (González-Fonteboa & Martínez-Abella, 2007) con el objetivo de identificar qué proporciones pueden ser incluidos los agregados reciclados de concreto para la formulación de concreto estructural. Sin embargo, también reportan incremento en la proporción agua-cemento de las mezclas creadas con ARC con la finalidad de obtener propiedades equiparables al concreto creado con AN (Ahmadi et al., 2017; Bravo et al., 2015; González-Fonteboa & Martínez-Abella,



2007). Gran cantidad de estudios indican que la calidad de concreto obtenida con agregados reciclados es inferior a la calidad del concreto creado con agregados naturales (Radonjanin et al., 2013) aun cuando se substituye el 100% de los AN se obtiene de un 10% a 25% menor resistencia a la compresión y a la tracción y un 5% a 35% menor en el módulo de elasticidad. Además de un mayor encogimiento (70%) y desgaste por arrastre (51%) que aquellos concretos creados solo con AN. En términos de durabilidad el concreto de agregados reciclados (CAR) resultó menos duradero en pruebas, igualmente tuvo una mayor absorción de agua (33%) y penetración de cloruros (14%) comparado con concretos creados a partir de agregados naturales.(Kwan, Ramli, Kam, & Sulieman, 2012; Olorunsogo & Padayachee, 2002).

Las interacciones de los agregados reciclados con el nuevo mortero y con el concreto han sido estudiadas desde el punto de vista de cumplimiento de parámetros físicos y mecánicos como los vistos anteriormente. Sin embargo las propiedades fisico-químicas y mineralógicas de los agregados reciclados no cuentan con una amplia investigación(Angulo et al., 2009; Bianchini, Marrocchino, Tassinari, & Vaccaro, 2005; Limbachiya et al., 2007). El estudio de las propiedades químicas, y mineralogías provee mayor comprensión de los fenómenos que ocurren en el agregado y como este ha sido afectado después de haber sido expuesto a diferentes acciones por parte del medio por largos periodos de tiempo. De esta manera es posible detectar la presencia de sustancias indeseables como cloruros, sulfatos, contaminantes absorbidos, cantidad y proporciones de carbonatos y también conocer las características mineralógicas del agregado natural contenido dentro del agregado reciclado. (Angulo et al., 2009; Limbachiya et al., 2007; Rodrigues et al., 2013).

La adopción de técnicas químicas y mineralógicas para la detección de la calidad de los agregados reciclados tiene el potencial para incrementar la confianza y facilitar su introducción en

el mercado ya sea para uso en construcción o para el desarrollo de nuevas aplicaciones. (Angulo et al., 2009)

La caracterización química de los agregados reciclados se ha basado en análisis de fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX), cantidad de sulfatos solubles en ácido y agua, cantidad de sales solubles, presencia y cantidad de contaminantes orgánicos, contaminantes perjudiciales para la salud (cromo, plomo), carbonatos, termogravimetría. Estos solo son algunos análisis comúnmente realizados en las investigaciones que incluyen análisis fisicoquímicos y mineralógicos a los agregados reciclados.

Los agregados reciclados son muy variados en su composición química según estudios realizados (Angulo et al., 2009; Limbachiya et al., 2007; Medina, Zhu, Howind, Frías, & De Sánchez Rojas, 2015), los análisis de FRX para los diferentes agregados reciclados dependen en gran medida de los agregados naturales que fueron utilizados para la construcción de la obra inicial (Limbachiya et al., 2007; O'Mahony & Milligan, 1991). Este comportamiento dificulta un procedimiento único de estandarización para los agregados reciclados. En las tablas a continuación se muestran resultados de análisis de FRX para agregados reciclados de diferentes investigaciones, los resultados están ordenados por tamaño, dado que se han encontrado tendencias de los componentes en relación al tamaño de partícula que compone el agregado reciclado.

Tabla 1 Análisis de la composición química de las gravas de los agregados reciclados utilizando FRX para los 4 óxidos principales, Silicio, Calcio, Aluminio y Hierro.

**Composición química de gravas de agregados reciclados**

<b>Tipo</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fuente</b>
AR	54.37	7.94	12.9	8.28	Medina et al 2015
Residuos de concreto (AR)	58.29	13.27	7.69	6.12	Medina et al 2015
Agregado no ligado (AR)	69.3	3.62	9.32	6.99	Medina et al 2015
ARC #1	65.37	13.93	5.33	2.16	Limbachiya et al, 2007
ARC #2	68.43	11.19	5.49	2.4	Limbachiya et al, 2007
ARC #3	63.61	16.86	3.57	2.03	Limbachiya et al, 2007
AR	62.56	12.01	12.52	5.82	Bui et al
AR (sin material indeseable, >4.0mm)	38.6 - 31.0	23.3 - 21.7	7.26 - 5.55	2.9 - 1.8	Bianchini et al, 2005
AR(triturado, 80mm - 10mm, >4.0mm)	42.9 - 38.7	22.8 - 19.2	8.8 - 7.3	3.6 - 3.1	Bianchini et al, 2005
AR(triturado fino, >4.0mm)	37.5 - 35.4	23.1 - 22.5	7.35 - 6.89	3.1 - 2.9	Bianchini et al, 2005
AR - rojo - 19.1-25.4(Sao Paulo)	68.4	5.8	11.2	3.3	Angulo et al, 2009
AR - gris - 19.1-25.4(Sao Paulo)	65.1	9.1	9.2	3.1	Angulo et al, 2009
AR - rojo - 19.1-25.4(Vinhedo)	66.1	9.1	9.9	2.8	Angulo et al, 2009
AR - rojo - 12.7-19.1(Sao Paulo)	68.6	6.5	10.2	3.3	Angulo et al, 2009
AR - gris - 12.7-19.1(Sao Paulo)	65.6	9.2	8.9	3.2	Angulo et al, 2009
AR - rojo - 12.7-19.1(Vinhedo)	69.4	5.2	11.3	3.5	Angulo et al, 2009
AR - rojo - 9.5-12.7(Sao Paulo)	65.3	8.2	10.1	3.3	Angulo et al, 2009
AR - gris - 9.5-12.7(Sao Paulo)	67.9	8.4	8.4	2.6	Angulo et al, 2009
AR - rojo - 9.5-12.7(Vinhedo)	69.4	7.1	8.8	2.7	Angulo et al, 2009
AR - rojo - 4.8-9.5(Sao Paulo)	65.6	8.8	9.3	3.2	Angulo et al, 2009

Tabla 1 (continuación) Análisis de la composición química de las gravas de los agregados reciclados utilizando FRX para los 4 óxidos principales, Silicio, Calcio, Aluminio y Hierro.

**Composición química de gravas de agregados reciclados**

<b>Tipo</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fuente</b>
AR - gris - 4.8–9.5(Sao Paulo)	66.1	8.7	9.3	2.7	Angulo et al, 2009
AR - rojo - 4.8–9.5(Vinhedo)	67.6	6.8	10.8	3.2	Angulo et al, 2009
AR (sin material indeseable, 4.0mm - 2.0mm)	47.4 - 25.2	26.5 - 18.0	8.07 - 4.5	3.6 - 1.43	Bianchini et al, 2005
AR(triturado, 80mm - 10mm, 4.0mm - 2.00mm)	45.7 - 39.2	21.8 - 15.4	11.3 - 7.92	4.32 - 3.44	Bianchini et al, 2005
AR(triturado fino, 4.0mm - 2.00mm)	41.25 - 39.7	20.7 - 18.9	8.42 - 8.01	3.41 - 3.16	Bianchini et al, 2005
AR - rojo - 2.4–4.8(Sao Paulo)	66.9	8.9	8.7	2.7	Angulo et al, 2009
AR - gris - 2.4–4.8(Sao Paulo)	66.5	8.7	8.7	2.6	Angulo et al, 2009
AR - rojo - 2.4–4.8(Vinhedo)	68.4	6.2	10.2	3.4	Angulo et al, 2009

Tabla 2 análisis de la composición química de los finos de los agregados reciclados utilizando FRX para los 4 óxidos principales, silicio, calcio, aluminio y hierro.

**Composición química de agregados reciclados mediante FRX**

<b>Tipo</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fuente</b>
AR - rojo - 1.2–2.4(Sao Paulo)	68.7	6.8	8.6	3.1	Angulo et al, 2009
AR - gris - 1.2–2.4(Sao Paulo)	67.7	8.2	8.1	2.4	Angulo et al, 2009
AR - rojo - 1.2–2.4(Vinhedo)	76.8	4.1	7.5	2.6	Angulo et al, 2009
AR (sin material indeseable, 2.0mm - 0.6mm)	47.7 - 37.2	21.6 - 17.5	9.3 - 6.51	3.7 - 2.1	Bianchini et al, 2005
AR(triturado, 80mm - 10mm, 2.0mm - 0.6mm)	49.15 - 43.16	19.9 - 14.6	11.0 - 9.2	4.3 - 3.4	Bianchini et al, 2005
AR(triturado fino, 2.0mm - 0.6mm)	49.8 - 47.3	16.5 - 14.4	9.7 - 9.1	3.9 - 3.6	Bianchini et al, 2005
AR - rojo - 0.6–1.2(Sao Paulo)	71.6	5.3	7.6	2.8	Angulo et al, 2009
AR - gris - 0.6–1.2(Sao Paulo)	71.5	7.3	7	2.2	Angulo et al, 2009
AR - rojo - 0.6–1.2(Vinhedo)	83.7	2.6	5	2.1	Angulo et al, 2009
AR - rojo - 0.3–0.6(Sao Paulo)	71.6	5.2	7.4	3	Angulo et al, 2009
AR - gris - 0.3–0.6(Sao Paulo)	75.7	6	5.7	2	Angulo et al, 2009
AR - rojo - 0.3–0.6(Vinhedo)	84.2	2.4	4.6	2.1	Angulo et al, 2009
AR (sin material indeseable, 0.6mm - 0.125mm)	60.2 - 57.13	12.6 - 11.6	9.6 - 8.6	3.2 - 2.7	Bianchini et al, 2005
AR(triturado, 80mm - 10mm, 0.6mm - 0.125mm)	54.4 - 53.3	15.3 - 14.0	10.1 - 9.1	3.6 - 3.2	Bianchini et al, 2005
AR(triturado fino, 0.6mm - 0.125mm)	59.6 - 55.6	12.7 - 10.7	9.6 - 9.5	3.3 - 3.3	Bianchini et al, 2005
AR - rojo - 0.15–0.3(Sao Paulo)	65.7	6.7	9.5	3.3	Angulo et al, 2009
AR - gris - 0.15–0.3(Sao Paulo)	68.5	7.8	7.2	2.6	Angulo et al, 2009
AR - rojo - 0.15–0.3(Vinhedo)	81.4	3	5.5	2.3	Angulo et al, 2009

Tabla 2 (continuación) análisis de la composición química de los finos de los agregados reciclados utilizando FRX para los 4 óxidos principales, silicio, calcio, aluminio y hierro.

**Composición química de agregados reciclados mediante FRX**

<b>Tipo</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fuente</b>
AR - rojo - <0.15(Sao Paulo)	48.3	11.1	12.9	4.3	Angulo et al, 2009
AR - gris - <0.15(Sao Paulo)	48	13.9	10.8	3.5	Angulo et al, 2009
AR - rojo - <0.15(Vinhedo)	52.2	7.8	17.2	5	Angulo et al, 2009
AR (sin material indeseable, 0.125mm - 0.075mm)	46.5 - 40.0	20.8 - 16.7	10.9 - 8.4	4.5 - 3.7	Bianchini et al, 2005
AR(triturado, 80mm - 10mm, 0.125mm - 0.75mm)	45.7 - 42.1	20.0 - 16.9	10.9 - 10.1	4.4 - 4.2	Bianchini et al, 2005
AR(triturado fino, 0.125mm - 0.75mm)	50.4 - 45.1	16.7 - 14.0	11.5 - 10.3	4.5 - 4.2	Bianchini et al, 2005
AR (sin material indeseable, <0.075mm)	41.4 - 36.6	22.0 - 18.7	10.4 - 8.6	4.4 - 3.7	Bianchini et al, 2005
AR(triturado, 80mm - 10mm, <0.075mm)	42.4 - 41.5	19.4 - 18.0	10.7 - 10.3	4.5 - 4.2	Bianchini et al, 2005
AR(triturado fino, >0.075mm)	48.5 - 44.5	16.7 - 14.5	11.1 - 10.6	4.3 - 4.3	Bianchini et al, 2005
Material arcilloso (AR, <0.075)	76.27	2.31	11.91	3.64	Medina et al 2015

En las tablas 1 y 2 se observan las diferentes concentraciones de óxidos para los distintos tipos de agregados. Estas concentraciones no siguen un patrón general, y dependen en gran medida de los agregados naturales utilizados, y estos a su vez depende de la veta donde se obtuvo el agregado natural la cual depende de la geografía del punto de extracción (O'Mahony & Milligan, 1991), por lo cual es difícil tener agregados químicamente parecidos unos con otros. Las características más sobresalientes de estos agregados son el porcentaje de óxidos de silicio que contienen, que suele ser mayor que el porcentaje de todos los demás óxidos, seguido de los óxidos

de aluminio y calcio, dependiendo de la veta los óxidos de calcio pueden tener una proporción tan grande como los de silicio.

*Tabla 3 Porcentaje de pérdidas por ignición para diferentes gravas de agregados reciclados.*

***Perdidas por ignición LOI (%p/p) para gravas de agregados reciclados.***

<b><i>Tipo de agregado reciclado</i></b>	<b><i>% LOI</i></b>	<b><i>Fuente</i></b>
<i>ARC #1</i>	9.12	Limbachiya et al, 2007
<i>ARC #2</i>	7.56	Limbachiya et al, 2008
<i>ARC #3</i>	9.19	Limbachiya et al, 2009
<i>AR (Sin material indeseable, &gt;4.0mm)</i>	27.4 - 21.4	Bianchini et al, 2005
<i>AR (Triturado, 80mm - 10mm, &gt;4.0mm)</i>	20.7 - 17.3	Bianchini et al, 2005
<i>AR Gris, Sao Paulo, 19.1–25.4)</i>	7.2	Angulo at al, 2009
<i>AR Rojo, Sao Paulo, 19.1–25.4)</i>	4.9	Angulo at al, 2009
<i>AR Rojo, Vinhedo, 19.1–25.4)</i>	7.1	Angulo at al, 2009
<i>AR Gris, Sao Paulo, 12.7–19.1)</i>	7.2	Angulo at al, 2009
<i>AR Rojo, Sao Paulo, 12.7–19.1)</i>	4.6	Angulo at al, 2009
<i>AR Rojo, Vinhedo, 12.7–19.1)</i>	5.7	Angulo at al, 2009
<i>AR Gris, Sao Paulo, 9.5–12.7)</i>	8.1	Angulo at al, 2009
<i>AR Rojo, Sao Paulo, 9.5–12.7)</i>	7	Angulo at al, 2009
<i>AR Rojo, Vinhedo, 9.5–12.7)</i>	7.5	Angulo at al, 2009
<i>AR (Triturado, &lt; 10mm, &gt;4.0mm)</i>	23.5 - 21.9	Bianchini et al, 2005
<i>AR Gris, Sao Paulo, 4.8–9.5)</i>	8.2	Angulo at al, 2009
<i>AR Rojo, Sao Paulo, 4.8–9.5)</i>	7.6	Angulo at al, 2009
<i>AR Rojo, Vinhedo, 4.8–9.5)</i>	6.8	Angulo at al, 2009
<i>AR (Sin material indeseable, 4.0mm - 2.0mm)</i>	31.4 - 15.7	Bianchini et al, 2006
<i>AR (Triturado, 80mm - 10mm, 4.0mm - 2.0mm)</i>	20.1 - 15.0	Bianchini et al, 2006
<i>AR (Triturado, &lt; 10mm, 4.0mm - 2.0mm)</i>	20.05 - 20.1	Bianchini et al, 2006

Tabla 4 Porcentaje de pérdidas por ignición para diferentes finos de agregados reciclados

**Pérdidas por ignición LOI (%p/p) para finos de agregados reciclados.**

<b>Tipo de agregado reciclado</b>	<b>% LOI</b>	<b>Fuente</b>
<i>AR Gris, Sao Paulo, 2.4–4.8)</i>	9	Angulo et al, 2009
<i>AR Rojo, Sao Paulo, 2.4–4.8)</i>	7.8	Angulo et al, 2009
<i>AR Rojo, Vinhedo, 2.4–4.8)</i>	6.3	Angulo et al, 2009
<i>AR Gris, Sao Paulo, 1.2–2.4)</i>	8.4	Angulo et al, 2009
<i>AR Rojo, Sao Paulo, 1.2–2.4)</i>	7.9	Angulo et al, 2009
<i>AR Rojo, Vinhedo, 1.2–2.4)</i>	5.1	Angulo et al, 2009
<i>AR (Sin material indeseable, 2.0mm - 0.6mm)</i>	23.1 - 14.2	Bianchini et al, 2007
<i>AR (Triturado, 80mm - 10mm, 2.0mm - 0.6mm)</i>	16.6 - 12.9	Bianchini et al, 2007
<i>AR (Triturado, &lt; 10mm, 2.0mm - 0.6mm)</i>	15.8 - 14.6	Bianchini et al, 2007
<i>AR Gris, Sao Paulo, 0.6–1.2)</i>	6.9	Angulo et al, 2009
<i>AR Rojo, Sao Paulo, 0.6–1.2)</i>	7.5	Angulo et al, 2009
<i>AR Rojo, Vinhedo, 0.6–1.2)</i>	3.4	Angulo et al, 2009
<i>AR Gris, Sao Paulo, 0.3–0.6)</i>	7.8	Angulo et al, 2009
<i>AR Rojo, Sao Paulo, 0.3–0.6)</i>	7.8	Angulo et al, 2009
<i>AR Rojo, Vinhedo, 0.3–0.6)</i>	3.9	Angulo et al, 2009
<i>AR (Sin material indeseable, 0.6mm - 0.125mm)</i>	11.3 - 9.1	Bianchini et al, 2008
<i>AR (Triturado, 80mm - 10mm, 0.6mm - 0.125mm)</i>	12.1 - 11.2	Bianchini et al, 2008
<i>AR (Triturado, &lt; 10mm, 0.6mm - 0.125mm)</i>	11.4 - 9.8	Bianchini et al, 2008
<i>AR Gris, Sao Paulo, 0.15–0.3)</i>	10	Angulo et al, 2009
<i>AR Rojo, Sao Paulo, 0.15–0.3)</i>	9.4	Angulo et al, 2009
<i>AR Rojo, Vinhedo, 0.15–0.3)</i>	4.3	Angulo et al, 2009
<i>AR Gris, Sao Paulo, &lt;0.15)</i>	19.6	Angulo et al, 2009
<i>AR Rojo, Sao Paulo, &lt;0.15)</i>	19.2	Angulo et al, 2009
<i>AR Rojo, Vinhedo, &lt;0.15)</i>	13.9	Angulo et al, 2009
<i>AR (Sin material indeseable, 0.125mm - 0.075mm)</i>	20.9 - 15.5	Bianchini et al, 2009
<i>AR (Triturado, 80mm - 10mm, 0.125mm - 0.075mm)</i>	15.9 - 15.6	Bianchini et al, 2009
<i>AR (Triturado, &lt; 10mm, 0.125mm - 0.075mm)</i>	14.5 - 13.5	Bianchini et al, 2009
<i>AR (Sin material indeseable, &lt;0.075mm)</i>	22.3 - 17.6	Bianchini et al, 2010
<i>AR (Triturado, 80mm - 10mm, &lt;0.075mm)</i>	17.2 - 16.6	Bianchini et al, 2010
<i>AR (Triturado, &lt; 10mm, &lt;0.075mm)</i>	15.6 - 14.5	Bianchini et al, 2010



Las pérdidas por ignición suelen ser utilizadas para obtener un acercamiento de las cantidades de carbonatos y agua hidratada en los minerales presentes. El rango mostrado en la tabla 3 y 4 es bastante amplio, aunque se observa que para los tamaños de agregado mayores, el porcentaje de pérdidas por ignición es menor que para tamaños menores, donde las arcillas llegan a tener porcentajes de pérdidas por ignición hasta de 22%, porcentaje solo superado para los agregados reciclados sin clasificar, estos por lo general contienen materiales plásticos, yesos, maderas, en tamaños pequeños que no son retirados (Bianchini et al., 2005).

Con el fin de describir y entender la composición de los agregados reciclados es necesario realizar un análisis deconstructivo mismo y analizar los materiales que llevaron a su formación como lo es el concreto, y a su vez los materiales de formación del concreto, los agregados naturales, el cemento y aditivos.

## 6.2 Características de los agregados naturales.

No se puede restar importancia a los agregados naturales, dado que estos conforman entre el 70% a 80% del concreto, y no son menos importantes que la pasta de cemento, el agua libre, aire atrapado o aditivos. Estos materiales también llamados áridos, son normalmente inertes, de forma granular, naturales (en algunos casos artificiales) que aglomerados por el cemento conforman un todo compacto, conocido como concreto. (Sánchez de Guzman, 2001)

Se puede decir que son materiales que teniendo una resistencia propia suficiente no afectan las propiedades y características del concreto y garantizan una adherencia suficiente con la pasta endurecida. En general son inertes, sin embargo hay algunos cuya fracción fina presenta actividad, como materiales volcánicos de sílice activa y escoria de horno o ladrillo triturado entre otros (Moreno Rodriguez & Buzon Ojeda, 2009; Neville & Brooks, 1998; Sánchez de Guzman, 2001).

Su origen y naturaleza pueden deberse a procesos de fragmentación de una masa mayor, por procesos como intemperismo y abrasión o trituración mecánica, y su mayoría de propiedades y características dependen de la roca madre que se refiere a propiedades mineralógicas y substanciales, petrografías, pureza, densidad dureza, porosidad, propiedades físico-mecánicas, composición química y estructura etc. (Sánchez de Guzman, 2001)

En geología se pueden considerar tres tipos de rocas:

Las ígneas o endógenas: que comprenden gran parte de la corteza terrestre y de ellas se derivan las otras rocas, estas se originan en procesos internos y magmáticos y dependiendo del gradiente de solidificación pueden ser: intrusivas plutónicas o abisales de solidificación lenta y consolidadas a gran profundidad, rocas filonianas o hipoabisales de solidificación media consolidadas a una profundidad media, y rocas extrusivas, efusivas o volcánicas de solidificación

rápida y su consolidación ocurre cerca de la superficie o por erupción volcánica. Su velocidad de enfriamiento influye en el tamaño. (Sánchez de Guzman, 2001)

Rocas sedimentarias: de mayor abundancia en la superficie están constituidas por fragmentos de rocas metamórficas, ígneas u otras rocas sedimentarias; estas puede originarse por descomposición y desintegración de las anteriores, a causa de procesos de deposición y consolidación o por procesos de precipitación o deposición química (carbonatos). Las rocas sedimentarias se clasifican dependiendo del agente geológico externo y el tamaño como se muestra en la tabla. 1 y 2 respectivamente. (Sánchez de Guzman, 2001)

*Tabla 5 clasificación de rocas sedimentarias según agente geológico externo. tomada de (Sánchez de Guzman, 2001)*

<b><i>Agente</i></b>	<b><i>Transporte</i></b>	<b><i>Deposito</i></b>
<i>Agua</i>	Rio	Depósitos aluviales de canto rodado, gravas, arcilla, limo entre otras.
	Lago	Depósitos lacustres en estratos horizontales.
	Mar	Depósitos marinos que dependen de vientos y mareas.
<i>Hielo</i>	Glaciar	Mezcla de toda clase de materiales y tamaños
<i>Aire</i>	Viento	Dunas o barjanes (arenas o limos)

*Tabla 6 Clasificación de los depósitos de rocas sedimentarias (Sánchez de Guzman, 2001)*

<b><i>Depósito no consolidado</i></b>	<b><i>Tamaño de partícula (mm)</i></b>	<b><i>Depósito consolidado de rocas</i></b>
<i>Cantos</i>	256 – 64	Conglomerado muy grueso
<i>Gravas</i>	64 – 5	Conglomerado
<i>Arenas</i>	5 – 0.074	Arenisca
<i>Limos</i>	0.074 – 0.002	Limolitos
<i>Arcillas</i>	< 0.002	Arcillolitas, lulitas o arginitas (según compactación)

Rocas metamórficas, provenientes de rocas ígneas y sedimentarias, formadas mediante modificación en sólido originadas por factores como: grandes presiones en estratos profundos, temperaturas elevadas, y emanaciones de gases de magma. Según sean estos factores puede tener dos clases de metamorfismo: de contacto debido a la intrusión del magma y el calor la roca es formada por transformación iónica y por la fluidez que permite modificar sin fragmentar los cristales y metamorfismo regional o dinámico que ocupa generalmente grandes extensiones y se presenta a grandes profundidades en condiciones de gran presión y confinamiento originan reacciones químicas que producen reagrupamiento molecular, creando rocas más densas y de diferente estructura.(Sánchez de Guzman, 2001).

La clasificación también puede realizarse desde el punto de vista petrográfico realizando un análisis de comparación visual y litológicos con diferentes tipos de roca que permiten evaluar la calidad. La EN BS-812-75 establece una clasificación (tabla 3) según el tipo de roca y mediante la STM C295 se puede ejecutar técnicas que permitan el análisis petrográfico. Además, el análisis mineralógico permite conocer mejor el material analizando la roca madre de donde proviene.

Tabla 7 Clasificación de agregados naturales según tipo de roca. Fuente EN BS-812-75

<b>Grupo</b>	<b>Tipo de roca</b>		
<i>Basáltico</i>	Andesita	Basalto	Porfíritas básicas
	Diabasa	Doleritas (todas clases incluyendo teralina y tesquenita)	epidiorita
	Lamprófiro		espilita
	Cuarzo – dolerita		
<i>Granítico</i>	Gneis	Granito	Granodiorita
	Pegmatita	Cuarzo - diorita	Granulita
	sienita		
<i>Pedernalio</i>	Horsteno	Pedernal	
<i>Arenisco</i>	Arcosa	Grawaca	Arenilla
	Arenisca	Tufa	
<i>Gabrico</i>	Diorita básica	Gneis Básico	Gabro
	Hornoblenda-roca	Norita	Peridotita
	Picrita	Serpentina	
<i>Hornofelsico</i>	Rocas que se alteran al contacto de todas clases excepto mármol		
<i>Calizo</i>	Dolomita	Caliza	Mármol
<i>Porfíritico</i>	Aplita	Dacita	Felsita
	Granofiro	Queratofiro	Microgranito
	Profido	Cuarzo-porfirita	Reolita
	Traquita		
<i>Esquistoso</i>	Filita	Esquisto	Pizarra
	Todas las piedras severamente fracturadas		
<i>Cuarzoso</i>	Arcilla refractaria	Cuarzita recristalizada	

Además de estas clasificaciones, los agregados pueden clasificarse por tamaño, procedencia (natural o artificial), densidad (ligero entre 400 kg/m<sup>3</sup> y 2000 kg/m<sup>3</sup>, normal entre 2000 kg/m<sup>3</sup> y 2500 kg/m<sup>3</sup>, y pesado entre 2500 kg/m<sup>3</sup> y 5600 kg/m<sup>3</sup>), entre otras.

### **6.2.1 Propiedades de los agregados.**

Las propiedades de los agregados se agrupan en propiedades químicas y físicas. Aunque los agregados tienden a clasificarse como inertes hay dos propiedades químicas que resaltan, una es la epitaxia un fenómeno favorable que mejora la adherencia en el tiempo, entre ciertos agregados calizos y la pasta de cemento. Y la reacción agregado álcali que induce esfuerzos internos debido al cambio volumétrico ocurrido por la reacción entre óxidos de silicio en sus formas inestables y los hidróxidos alcalinos de la pasta de cemento. También existe otra reacción llamada álcalis-carbonato.(Moreno Rodriguez & Buzon Ojeda, 2009; Sánchez de Guzman, 2001).

De las propiedades físicas, la granulometría es una de las más importantes de las cuales existen varias normas según el tipo de aplicación para regular las franjas granulométricas del agregado para construcción, también se observan otras propiedades como: la textura, la superficie específica, la densidad, la porosidad y absorción, el peso volumétrico, y propiedades mecánicas como la resistencia de las partículas del agregado, la tenacidad, adherencia, dureza.(Moreno Rodriguez & Buzon Ojeda, 2009).

### **6.2.2 Sustancias perjudiciales en los agregados.**

En los agregados existen sustancias que al estar presentes en ciertas proporciones pueden resultar perjudiciales para el concreto ya sea debido a las reacciones que ocurren entre estas sustancias y los componentes del cemento o por la degradación que tienen al pasar el tiempo. A continuación se presentan algunas de estas sustancias. (Sánchez de Guzman, 2001)

- Arcillas y material con diámetro inferior a 0.074mm: estos materiales interfieren en la adherencia de la pasta de cemento con los agregados, disminuyen la capacidad

aglutinadora del cemento, resultando en pérdidas de resistencia. Por otro lado, las arcillas expansivas generan esfuerzos adicionales en presencia de agua y pueden conducir a fallas, y los limos aumentan la cantidad de agua necesaria debido a la alta superficie específica que tienen. El contenido indeseable de estas partículas se controla mediante la NTC 174.

- La materia orgánica afecta las reacciones de hidratación, incidiendo en el fraguado. la NTC 174 estipula el mínimo de materia orgánica y se puede realizar una prueba colorimétrica para determinar de forma relativa la cantidad de materia orgánica, utilizando la NTC 127.
- La contaminación salina puede afectar los refuerzos debido al fenómeno de corrosión, producir manchas en el concreto, usualmente se recomienda lavar con agua dulce la arena proveniente de depósitos marinos.
- Salinidad de los agregados hace referencia a soportar las tensiones por cambio de volumen debido a cambios ambientales, como cambios grandes de temperatura, congelamiento-deshielo, humedecimiento-secado, dado que estos pueden afectar la estructura producir agrietamientos o descamación, la capacidad para soportar estos cambios dependerá de la procedencia, granulometría, forma, textura, porosidad y propiedades mecánicas de las partículas (Sánchez de Guzman, 2001).

### **6.2.3 Características de agregados naturales en el Atlántico.**

Al momento de diseñar obras civiles es muy importante conocer la ubicación de la fuente de materiales, las características de los materiales y el costo.

Los agregados gruesos y finos, en el Atlántico, se obtienen de la explotaciones de aproximadamente 45 canteras, a continuación en la tabla 4 se dan detalles de la composición y ubicación de las canteras. (Moreno Rodriguez & Buzon Ojeda, 2009).

*Tabla 8 Fuentes de materiales en el departamento del Atlántico (Moreno Rodriguez & Buzon Ojeda, 2009)*

<b>Cantera</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Roca de explotación.</b>
<i>Bula Fritz</i>	Municipio de Repelón, a 4km del cruce de la vía La Cordialidad con la vía a Repelón.	Gravas de Rotinet; compuestas por gravas no consolidadas de roca volcánica.
<i>Puerto Rico</i>	Municipio de Repelón, corregimiento de Rotinet a 4.5 km de la carretera cordialidad.	Gravas de Rotinet y limolitas ferruginosas.
<i>Alfagres S.A.</i>	Municipio de Tubará, predio el Chuval, vereda de Bajo San Luis.	Areniscas de grano medio a fino, constituidas por cuarzo, feldespatos, micas, anfíboles. También depósitos de arenas finas arcillosas color amarillo.
<i>Agrecon S. A.</i>	Municipio de Luruaco, carretable del corregimiento de Arroyo de Piedra a la región de Agua Hedionda.	Existen dos depósitos acumulados durante varias etapas de sedimentación: areniscas y arcillolitas denominadas turbiditas de Luruaco, pertenecientes a la edad terciaria. La actividad de extracción minera refiere a mineral de caliza para concretos y cementos.
<i>El Pavilo</i>	Corregimiento de Arroyo de Piedra, municipio de Luruaco.	Caliza, caliche y conglomerado. Se venden molidos como carbonato de calcio y también triturados para construcción.
<i>Ingecost S.A.</i>	Municipio de Luruaco, corregimiento de Arroyo de Piedra sobre la margen de la vía La Cordialidad.	Rocas sedimentarias, en su mayoría de origen marino y depósitos cuaternarios litorales y continentales. Se explota material de arena y triturado de roca.
<i>Construcciones y molinos Ochoa Ltda.</i>	Km 9 costado de la Vía al Mar de Barranquilla a Puerto Colombia.	Calizas y areniscas arrecifales de origen sedimentario marino.
<i>El Litoral</i>	Municipio de Puerto Colombia a 12km de Barranquilla.	Gravas, arenas, piedra recebo y conglomerado.



Tabla 8 (continuación) Fuentes de materiales en el departamento del Atlántico (Moreno Rodriguez & Buzon Ojeda, 2009)

Cantera	Ubicación	Roca de explotación.
<i>San Antonio</i>	Municipio de Santo Tomas, sobre la vía a Polonuevo.	Los suelos de este municipio están formados por materiales sedimentarios de naturaleza fluvial, formando orillares, diques naturales, terrazas entre otros. Se extrae arena.
<i>El Limón</i>	Municipio de Candelaria.	Grava y arena triturada.
<i>C.I. Impernorte del Caribe Ltda.</i>	Corregimiento de Salgar, municipio de Puerto Colombia.	Calizas y areniscas arrecifales de origen sedimentario marino.
<i>Munarritz</i>	Km 5 de la vía Barranquilla – Puerto Colombia.	Calizas y areniscas arrecifales de origen sedimentario marino.

Moreno Rodriguez & Buzon Ojeda, 2009 realizaron varias investigaciones a los agregados del Atlántico. La información que se resume en la siguiente tabla corresponde a investigación de las propiedades físicas de los agregados gruesos y finos.

Tabla 9 Propiedades físicas de agregados extraídos de las canteras del departamento del Atlántico (Moreno Rodriguez & Buzon Ojeda, 2009).

<i>Propiedad Física</i>	<i>Agregado Grueso</i>		<i>Agregado Fino</i>
	Origen volcánico sedimentario	y Origen sedimentario marino.	
<i>Peso específico aparente seco (g/cm<sup>3</sup>)</i>	2.56-2.62	2.26-2.34	2.45-2.58
<i>Peso específico aparente saturado (g/cm<sup>3</sup>)</i>	2.61-2.66	2.4-2.49	2.52-2.65
<i>Peso específico nominal (g/cm<sup>3</sup>)</i>	2.69-2.73	2.57-2.66	2.57-2.65
<i>Peso unitario compacto (g/cm<sup>3</sup>)</i>	1.54-1.6	1.29-1.32	1.45-1.60
<i>Peso unitario suelto (g/cm<sup>3</sup>)</i>	1.39-1.42	1.15-1.21	1.29-1.51
<i>Absorción (%)</i>	1.38-1.92	3.86-6.43	0.81-1.79
<i>Módulo de finura</i>	-	-	2.02-3.24

### 6.3 Características del cemento Portland.

En un amplio sentido la palabra cemento se refiere a un aglomerante con propiedades de adherencia y cohesión, las cuales permiten unir fragmentos minerales entre sí, para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuada. Esta no es una definición única para el cemento portland sino a la generalización de gran variedad de materiales cementantes como cales, asfaltos y alquitranes. Al referirnos al cemento portland o base portland hablamos de una variedad de cemento con propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua mediante una reacción de hidratación. (Sánchez de Guzman, 2001).

El cemento portland se fabrica de forma general a partir de materiales minerales calcáreos como: caliza y yeso, una base de alúmina y sílice que se encuentran como arcilla o esquisto en la naturaleza. En ocasiones se hace necesario agregar otros productos químicos para mejorar la composición química de las materias primas principales el más común es el óxido de hierro (Neville & Brooks, 1998).

La caliza está compuesta por un alto porcentaje de carbonato de calcio (más de 60% de  $\text{CaCO}_3$ ) e impurezas como arcillas, sílice y dolomita entre otras. Hay diferentes tipos de arcillas todas funcionales siempre que no tengan grandes cantidades de magnesio, dado que este material aumenta su volumen y produce fisuras y pérdidas de resistencia con el tiempo. La arcilla está constituida principalmente por silicato hidratado complejo de aluminio, con porcentajes menores de hierro y otros elementos. La arcilla aporta los óxidos de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). (Neville & Brooks, 1998; Sánchez de Guzman, 2001)

El yeso o sulfato de calcio hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) es un aditivo que se agrega al final para controlar el tiempo de fragua.

El proceso de producción de cemento comprende las siguientes etapas (Sánchez de Guzman, 2001):

- Explotación de materias primas
- Preparación y dosificación de materias primas
- Homogenización
- Clinkerización
- Enfriamiento
- Adiciones finales y molienda
- Empaque y distribución

Después de mezclar las materias primas en correcta proporción, esta se muele por vía seca o semiseca formando una harina con partículas de tamaño de 0.05mm, luego se homogeniza en forma de pasta hasta garantizar un producto homogéneo que se lleva a clinkerización por vía húmeda o semiseca donde ocurren diferentes reacciones dependiendo de la temperatura.

*Tabla 10 Cambios de la materia prima ocurridos durante el proceso de clinkerización dentro de un horno (Sánchez de Guzman, 2001).*

<b><i>Temperatura</i></b>	<b><i>Proceso</i></b>	<b><i>Reacción</i></b>
<i>Hasta 100°C</i>	Evaporación de agua libre	Endotérmica
<i>Por encima de 500°C</i>	Deshidratación de minerales arcillosos	Endotérmica
<i>800°C</i>	Liberación de CO <sub>2</sub>	Exotérmica
<i>Por encima de 900°C</i>	Cristalización de productos minerales descompuestos	Exotérmica
	Descomposición de carbonatos	Endotérmica
<i>900°C a 1200°C</i>	Reacción de CaO con los silicoaluminatos.	Exotérmica
<i>1250°C a 1280°C</i>	Se inicia la formación de líquidos	Endotérmica
<i>1280°C hasta 1500°C</i>	Formación de líquidos y compuestos de cemento (clinkerización)	Endotérmica

Seguido el clinker se lleva a un proceso de enfriado rápido --necesario para evitar formación de periclasa, una forma de magnesio en forma cristalina la cual al hidratarse presenta aumento de volumen y posibilidad de desintegrar el concreto(Ye, Yu, & Zhang, 2015)-- y luego molienda más la adición de aditivos según corresponda al producto de cemento portland. Entre los aditivos, el regulador de fraguado convencional es una adición de yeso (2% a 5%) hasta esta adición el cemento recibe el nombre de Portland. Existen otros tipos de cemento como el siderúrgico, que contiene adiciones de escoria de alto horno; y el cemento portland puzolanico, obtenido de la pulverización de clinker de portland con puzolanas (material natural o artificial que contiene sílice en forma reactiva) como ceniza volante, arcilla calcinada o pumicita (Sánchez de Guzman, 2001)

### **6.3.1 Composición química del cemento.**

Cuando las materias primas (principalmente cal, sílice, alúmina, y óxido de hierro) interactúan en el horno rotatorio, forman una serie de productos más complejos, hasta llegar a un estado de equilibrio, con excepción de un residuo pequeño de cal no combinada. La química del cemento se le conoce como química de silicatos y aluminatos cálcicos anhidros e hidratados. Las formulas químicas a menudo se expresan como suma de óxidos: silicato tricalcico ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ) y suele expresarse como  $3\text{CaOSiO}_2$ . Esto no implica que los óxidos no existan de manera independiente en la mezcla(Ahmadi et al., 2017; Neville & Brooks, 1998; Sánchez de Guzman, 2001). También suelen utilizarse abreviaturas como C para CaO, los compuestos en formas de óxido y sus abreviaturas pueden verse en la siguiente tabla.

Tabla 11 Formulas químicas de óxidos más frecuentes en cementos y sus abreviaturas. (Neville & Brooks, 1998; Sánchez de Guzman, 2001)

<i>Nombre del oxido</i>	<i>Formula</i>	<i>Abreviatura.</i>
Óxido de Calcio	CaO	C
Dióxido de silicio	SiO <sub>2</sub>	S
Óxido de aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A
Óxido férrico	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F
Agua	H <sub>2</sub> O	H
Óxido de magnesio	MgO	M
Trióxido de azufre	SO <sub>3</sub>	s
Óxido de potasio	K <sub>2</sub> O	K
Óxido de sodio	Na <sub>2</sub> O	N
Óxido de litio	Li <sub>2</sub> O	L
Óxido de fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P
Óxido de hierro	FeO	f
Óxido de titanio	TiO <sub>2</sub>	T

Podemos encontrar otros compuestos formados a partir de los óxidos de la tabla 2, en la tabla 3 se describen los más comunes.

Tabla 12 Compuestos más comunes del cemento y sus abreviaturas. (Neville & Brooks, 1998)

<i>Nombre del compuesto</i>	<i>Composición del oxido</i>	<i>Abreviatura</i>
Silicato tricalcico	3CaOSiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
Silicato dicalcico	2CaOSiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Aluminio tricalcico	3CaOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Ferroaluminato tetracalcico	4CaOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

Estos productos descritos arriba se forman a determinadas temperaturas y cuando la mezcla se transforma en un líquido pastoso, que al enfriarse da origen a sustancias cristalinas de los compuestos de la tabla 3. Estos compuestos se presentan en fases, y en determinada proporción y ayudan a revelar información determinante del cemento. (Sánchez de Guzman, 2001)

La fase Alita a base de  $C_3S$ ; es la fase principal de los clinker portland y de ella depende gran parte de las características de desarrollo de resistencia mecánica, además el  $C_3S$  endurece más rápido e influye mayormente en la etapa de fraguado (Sánchez de Guzman, 2001).

- La fase Belita, a base de  $C_2S$ ; es la segunda más importante y junto con  $C_3S$  componen cerca del 75% de un cemento portland, esta fase se hidrata más lentamente y el desarrollo de resistencia se da después de una semana (Sánchez de Guzman, 2001).
- La fase aluminato, rica en  $C_3A$  no es un compuesto puro, pero también contiene otras impurezas de  $SiO_2$  y  $MgO$ . Esta contribuye a una alta resistencia inicial, pero con calor de hidratación alto, además le da al concreto, propiedades indeseables, como cambios volumétricos y pobre resistencia al sulfato, razón por la cual se limita entre 5% y 15% dependiendo el cemento (Sánchez de Guzman, 2001).
- Fase ferrito: compuesta de ferritos y aluminatos de calcio, también llamada Brown-millerita. Es una solución sólida que fluctúa desde  $C_2F$  hasta  $C_6A_2F$ , esta fase disminuye la temperatura de clinkerización y se trata de mantener al mínimo por ser un relleno. (Sánchez de Guzman, 2001).

Además de las fases principales descritas arriba hay otros compuestos o fases menores como cal libre ( $CaO$ ), Periclase ( $MgO$ ),  $TiO_2$ ,  $Mn_2O_3$ ,  $K_2O$  y  $Na_2O$  que se encuentran en una pequeña proporción. De estos compuestos son de vital importancia el óxido de sodio y potasio ( $Na_2O$  y  $K_2O$ ) conocidos como álcalis, estos reaccionan con algunos agregados y desintegran el concreto, además afectan la velocidad a la que el concreto desarrolla resistencia (Sánchez de Guzman, 2001).

En las tablas siguientes se indican las proporciones aproximadas en las que se encuentran los diferentes compuestos en el cemento

Tabla 13 Composición aproximada de óxidos del cemento portland (Neville & Brooks, 1998)

<b>Óxidos</b>	<b>Contenido en porcentaje (% p/p)</b>
<i>CaO</i>	60 – 67
<i>SiO</i>	17 – 25
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	3.0 – 8.0
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	0.5 – 6.0
<i>MgO</i>	0.1 – 4.0
<i>Álcalis</i>	0.2 – 1.3
<i>SO<sub>3</sub></i>	1.0 – 3.0

Tabla 14 Proporciones aproximadas de los compuestos del cemento portland.(Neville & Brooks, 1998) y contenido relativo en porcentaje de los compuestos principales calculado por método de Bogue del cemento en Colombia.(Sánchez de Guzman, 2001)

<b>Compuesto</b>	<b>Contenido en porcentaje %p/p</b>	<b>Contenido en porcentaje, (% p/p) en Colombia estimado mediante método de Bogue</b>
<i>C<sub>3</sub>S</i>	20 – 70	51.86
<i>C<sub>2</sub>S</i>	5.0 – 50	21.08
<i>C<sub>3</sub>A</i>	1.0 – 15	6.00
<i>C<sub>4</sub>AF</i>	1.0 - 17	10.65

Tabla 15 Composición promedio de los óxidos presentes y otros compuestos dentro del cementos en Colombia.(Sánchez de Guzman, 2001)

<b>Óxidos</b>	<b>Contenido en porcentaje (% p/p)</b>
<i>CaO</i>	62
<i>SiO</i>	21
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	4.5
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	3.5
<i>MgO</i>	1.0
<i>SO<sub>3</sub></i>	2.0
<i>K<sub>2</sub>O</i>	0.4
<i>Na<sub>2</sub>O</i>	0.1
<i>Otros</i>	1.0
<i>Perdida al fuego</i>	3.0
<i>Residuo insoluble</i>	1.5

La composición química es de gran importancia dado que los diferentes componentes otorgan diversas propiedades al cemento e inciden en sus diferentes etapas. Así entonces, el  $C_3S$  y  $C_2S$  otorgan buena resistencia mientras que  $C_3A$  y  $C_4AF$  no. La intensidad de la reacción es media para  $C_3S$ , lenta para  $C_2S$  y rápida para  $C_3A$  y  $C_4AF$  y la resistencia a los sulfatos es buena para  $C_3S$  y  $C_2S$  mientras que pobre y media para  $C_3A$  y  $C_3AF$  respectivamente. Debido a estas propiedades estos elementos inciden durante la etapa de fraguamiento y determinan el desarrollo de la resistencia del cemento pasados los días (Sánchez de Guzman, 2001).



## 6.4 Técnicas de análisis utilizadas en la caracterización del proyecto.

A continuación se describen los conceptos que rigen las técnicas de caracterización utilizadas en este proyecto.

### 6.4.1 Espectrometría de rayos X.

Las diferentes técnicas espectroscópicas basadas en rayos x pueden clasificarse en emisión (incluyendo emisión fluorescente), absorción y difracción.

**La emisión de rayos X:** Para fines analíticos, los rayos x se obtienen de 3 formas: 1) bombardeo de un blanco metálico con un haz de electrones de alta energía; 2) por exposición de una sustancia a un haz primario de rayos x, con el fin de generar un haz secundario de rayos x fluorescentes, y; 3) por el empleo de una fuente radioactiva cuyo proceso de desintegración da por resultado la emisión de rayos x.(Murcia-Mascarós, 2002).

Las fuentes de rayos X, como los emisores ultravioletas y visibles, a menudo producen un espectro continuo y uno discontinuo (líneas); ambos tipos son importantes en el análisis. La radiación continua se conoce también con el nombre de radiación blanca o con la palabra alemana Bremsstrahlung (significa radiación que se produce del retardo de partículas; suele ser continua)(Murcia-Mascarós, 2002).

#### **Espectros continuos que provienen de fuentes bombardeadas con un haz de electrones:**

En un tubo de rayos X, los electrones producidos en un cátodo calentado se aceleran hacia el ánodo por un potencial (usualmente 100 kV), después de la colisión parte de la energía del haz de electrones se convierte en rayos x. Bajo ciertas condiciones se obtiene un solo espectro continuo. Este se caracteriza por presentar un límite en el extremo de las longitudes de onda corta ( $\lambda_0$ ), está

bien definido y depende del voltaje de aceleración  $V$ , pero es independiente del material del blanco, en consecuencia  $\lambda_0$  para el espectro producido por un blanco de molibdeno a 35 kV es idéntico a  $\lambda_0$  para un blanco de tungsteno al mismo voltaje.(Murcia-Mascarós, 2002).

**Espectros de línea característicos producidos por las fuentes de haces de electrones:** En el caso del molibdeno su comportamiento de emisión no es típico de todos los elementos que tienen números atómicos mayores a 23. Estos son muy simples comparados con emisión UV y constan de dos series de líneas: el grupo de longitud de onda más larga se llama serie K y el otro serie L. Los elementos con números atómicos menores de 23 solo producen serie K. Otra característica de los espectros de rayos X es que el voltaje de aceleración mínimo requerido para la excitación de las líneas de cada elemento aumenta con el numero atómico.(Skoog & West, 1986).

Los espectros de líneas de rayos X resultan de las transiciones electrónicas que afectan a los orbitales atómicos más interiores. La serie K de longitud de onda corta es producida cuando los electrones de alta energía procedentes del cátodo eliminan electrones de aquellos orbitales más cercanos al número del átomo blanco. El choque da por resultado la formación de un ion excitado que pierde unos cuantos de radiación x cuando los electrones de los orbitales exteriores sufren transiciones al orbital vacante.(Skoog & West, 1986).

**Fuentes radioactivas:** La radicación puede producirse mediante dos procesos de desintegración radiactiva. Los rayos gamma que deben su producción a las reacciones intranucleares. Y la captura de electrones o captura K, donde curre una captura del electrón k (puede ser L o M pero es menos común) por el núcleo y se forma un elemento en el siguiente numero atómico inferior. (Skoog & West, 1986).

**Absorción de rayos X:** Cuando se pasa un estrecho haz de rayos X por una delgada capa de materia su intensidad disminuye como consecuencia de la absorción y la dispersión. El efecto de dispersión suele ser pequeño y puede despreciarse en aquellas regiones de longitud de onda donde el efecto de absorción es apreciable. Los espectros de absorción de un elemento al igual que los espectros de emisión, es simple y consta de algunos picos de absorción anchos y bien definidos; también las longitudes de onda de los picos son características del elemento y en gran parte independientes de su estado químico una peculiaridad de los rayos X es la aparición de claras discontinuidades, llamadas bordes de absorción en longitudes de onda inmediatamente más allá de los máximos de absorción. (Skoog & West, 1986)

**El proceso de absorción:** La absorción de un cuanto de rayos X causa la expulsión de uno de los electrones más internos de un átomo y la consiguiente producción de un ion excitado. En este proceso toda la energía  $h\nu$  de la radiación se divide entre la energía cinética del electrón (fotoelectrón) y la energía potencial del ion excitado. Surge la más alta probabilidad de absorción cuando la energía del cuanto es exactamente igual a la energía requerida para desplazar el electrón exactamente a la periferia del átomo (Skoog & West, 1986).

Otra característica de los procesos de absorción está relacionada con los coeficientes de absorción de cada elemento los cuales se correlacionan mediante la ley de Beer, aplicándose a la radiación de rayos X, cada elemento tiene coeficiente lineal único e independiente de los estados físicos y químicos del elemento, además de eso estos son funciones aditivas de las fracciones en peso de los elementos contenidos en la muestra. (Skoog & West, 1986).

**Fluorescencia de rayos X:** La absorción de rayos X produce iones excitados electrónicamente que vuelven a su estado fundamental por transiciones de electrones de niveles más altos de energía. Así, se produce un ion excitado con una capa K vacante. Tras un breve

periodo el ion vuelve a su estado fundamental mediante una serie de transiciones electrónicas caracterizadas por la emisión de radiación X (fluorescencia) de longitudes de onda idénticas a las que resultan de la excitación producida por bombardeo de electrones. Las longitudes de onda de las líneas fluorescentes son siempre algo mayores que la longitud de onda del borde de absorción correspondiente, porque la absorción requiere una eliminación completa del electrón (es decir, ionización) mientras que la emisión supone transiciones de un electrón a un nivel de energía más alto dentro del átomo (Murcia-Mascarós, 2002; Skoog & West, 1986).

#### **6.4.2 Determinación de porcentaje en masa de impurezas orgánicas mediante Loss Of Ignition (LOI)**

La materia orgánica o impurezas orgánicas de los suelos se define como la suma de los residuos de plantas y animales en diferentes etapas de descomposición, estos pueden ser células, o tejidos y sustancias bastante descompuestas (Brady y Weil, 1999 citado en Salehi, Beni, Harchegani, Borujeni, & Motaghian, 2011). La cantidad de materia orgánica presente en los suelos afecta fuertemente las propiedades fisicoquímicas y biológicas como: capacidad de intercambio catiónico, estructura del suelo, porcentaje de infiltración de agua capacidad de retención del agua, erodabilidad del suelo, y adsorción de pesticidas (Shulte, 1995 y Ding et al., 2002 citado en Salehi et al., 2011). Sin embargo, cuando se trata de agregados o concreto para construcción, el porcentaje de materia orgánica afecta el tiempo de fraguado y el endurecimiento, pudiendo causar deterioro en el concreto.

La pérdida por ignición se conoce comúnmente por su terminología en ingles Loss On Ignition (LOI). Es una prueba utilizada en química analítica para el análisis de minerales, que consiste en un calentamiento intenso de una muestra de material a una temperatura específica,

permitiendo que las sustancias volátiles escapen, hasta que a masa deje de cambiar. El análisis puede realizarse en aire, en una atmósfera reactiva o en presencia de un gas inerte.(ASTM, 2010b). El método de determinación de porcentaje de materia orgánica mediante la pérdida de peso de la muestra por ignición a temperatura constante fue propuesto por Dean en 1974 (Dean, 1974) a una temperatura de 550 °C como un método para aproximar el contenido de materia orgánica presente en muestras de forma económica y comparable con métodos como Analizador total de carbono o cromatografía de gases(de L Fong - Lee, Maria. Fernandez Perez, 1983). En este método la materia orgánica comienza su combustión entre 200 °C y completa su combustión a los 550 °C, y la mayoría de minerales carbonatos son destruidos a temperaturas mayores (calcitas entre 800 °C y 850 °C, dolomitas entre 700 °C y 750 °C). Según Dean, 1974 citado en Santisteban et al., 2004 el carbón orgánico contenido en las muestras se correlaciona de forma experimental como la mitad aproximada de LOI 550 °C (Dean 1974 y Heiri et al, 2001 citado en Santisteban et al., 2004) , y el cálculo del carbón inorgánico se asume como la relación estequiometria de la cantidad de carbonatos como  $1.36 \times \text{LOI } 950$ , esto implica que el carbón inorgánico  $\text{IC} = 0.273 \times \text{LOI } 950$  (Heiri et al, 2001 citado en Santisteban et al., 2004). Varios autores han mencionado que ciertos componentes volátiles no carbonáceos en los sedimentos pueden incrementar los valores de LOI, dándole mayor importancia a las arcillas, el yeso, minerales azufrosos, e hidróxidos metálicos también pueden modificar los valores de LOI vía oxidación o deshidratación (Brauer et al, 2000 citado en Santisteban et al., 2004). Otros errores puede producirse por perdidas de carbón inorgánico entre las temperaturas de 425 °C y 520 °C por parte de minerales como la siderita, magnesita, rodocrosita y dolomita, además de la dependencia de los resultados de LOI 550 debido al tamaño de la muestra, tiempo de exposición y posición de la muestra en la mufla (Heiri, Lotter, & Lemcke, 2001).

Sin embargo, las metodologías LOI 550 y 950 para la determinación de carbón orgánico e inorgánico suelen presentar errores acumulativos en presencia de muestras con contenido de arcillas, sales, yeso, y lo definen como una buena estrategia para obtener aproximaciones cualitativas y no cuantitativas de la cantidad de carbono orgánico e inorgánico en muestras de suelo (Santisteban et al., 2004).

Existen diferentes metodologías de aplicación del método de pérdidas por ignición, donde varían los tiempos de calentamiento a temperatura constante y la temperatura de ignición. Salehi et al., 2011 ha evaluado diferentes temperaturas manteniendo tiempos de 2 horas, en las cuales encontraron que la diferencia de temperaturas incide de manera negativa en la correlación de los resultados, a mayor temperatura la correlación de los resultados presenta mayor variabilidad y ajustes de  $R^2$  menores que a temperaturas menores a 400 °C; asimismo la presencia de carbonatos de calcio y arcillas incide de forma negativa en el porcentaje de materia orgánica dado que estos materiales pueden liberar agua hidratada durante la combustión y a mayor temperatura mayor el porcentaje de agua hidratada liberada. Salehi et al, 2011 atribuye este comportamiento a la pérdida de agua estructural en la illita, la esmectita y vermiculita. A temperaturas de 450 °C a 600 °C existe la posibilidad de pérdida de agua estructural para minerales como caolinita, yeso (21% agua estructural) y algunos cloruros. Por otro lado, a temperaturas mayores a 400°C no se encuentra presencia de materia orgánica en las muestras de suelos

Este método puede utilizarse para la determinación de carbón orgánico en suelos y carbón inorgánico, se ha encontrado que el carbón inorgánico puede ser mayor en relación de 2 a 10 veces que el carbón orgánico en suelos áridos y semiáridos (Scharpenseel et al., 2000 citado en Wang, Wang, & Zhang, 2013).

El análisis consiste en agregar unos gramos de la muestra en un crisol refractario cuya masa ha sido determinada previamente, luego se coloca en el hogar de la mufla por un tiempo determinado a una temperatura controlada, al cumplirse el tiempo se deja enfriar en una cámara libre de humedad y CO<sub>2</sub> y se determina nuevamente la masa. Una variante de este método donde la masa es monitoreada continuamente es conocida como termo gravimetría.(Sastre de Andres & Ferreira Aparicio, 2002).

Para la ejecución de la técnica es necesario una mufla capaz de alcanzar 1150 °C con un control de temperatura mejor de +/- 15 °C con una temperatura de uniformidad de +/-10 °C (LacCore, 2013).

#### Equipo

- Cisoles cerámicos
- Pinzas para crisol
- Dispositivo de muestreo (espátula o jeringa)
- Sílica Gel
- Horno de secado
- Mufla con capacidad de 1150 °C
- Balanza con precisión de 0.01 g

#### **6.4.3 Determinación de humedad superficial.**

La determinación de la humedad superficial es un análisis que busca determinar el contenido en masa de agua que no está presente en forma de hidratos (agua estructuralmente ligada a los compuestos de la muestra) en la muestra.

La humedad superficial está relacionada con la resistencia del concreto mediante la fórmula para la preparación del concreto, y esta humedad superficial debe ser tomada en cuenta al momento de ser tomada en cuenta para evitar excesos o faltantes en la mezcla de agua, agregados y cemento. (Sánchez de Guzman, 2001).

Para los materiales sólidos vistos desde el punto de vista de la ingeniería geotécnica estos se conciben como partículas naturales minerales de suelo y roca que no son solubles en agua. Sin embargo, el agua contenida en materiales que contienen materias extrañas (como el cemento) puede requerir un tratamiento especial o una definición calificada de contenido de agua. Además, algunos materiales orgánicos pueden descomponerse mediante el secado en horno a las temperaturas de secado para este método (110 °C). Los materiales que contienen yeso, (Sulfato de calcio di-hidratado) u otros componentes con cantidades significativas de hidratos pueden presentar un problema especial con estos materiales los cuales se deshidratan lentamente a la temperatura de secado (110 °C) y a una muy baja humedad relativa, formando compuestos (Como el sulfato de calcio hemihidratado), el cual no está presente de forma natural en los materiales a excepción de algunos suelos desérticos. En función de reducir el contenido de la cantidad de yeso deshidratado y de reducir la cantidad de material fibroso orgánico que se reduce por descomposición. Es deseable secar los materiales a 60 °C o en un desecador a temperatura ambiente. De esta forma si se utiliza un método diferente cuya temperatura es diferente a la estándar (110 °C) los resultados en contenido de agua pueden variar (ASTM, 2010a). El método utilizado en el proyecto es el ASTM D2216 – 10.



#### 6.4.4 Determinación de pH

El pH se define como el Logaritmo negativo de la actividad de iones  $H^+$  en la solución o suspensión, este valor expresa la acidez activa, el cual se representa matemáticamente como (ICONTEC, 2008b):

*Ecuación 1 Determinación de pH*

$$pH = -\log aH$$

Donde  $aH$  representa la actividad de iones hidrógeno en la solución.

La determinación de pH o acidez activa de los suelos, la cual corresponde a los iones hidrógeno de la solución del suelo, puede determinarse en el laboratorio a partir de un método potenciométrico.

Los métodos potenciométricos se basan en la comparación del potencial eléctrico producido por los iones  $H^+$  en la solución con el potencial constante que produce un electrodo de referencia o patrón. Los iones  $H^+$  son medidos por un electrodo de hidrógeno (ICONTEC, 2008b).

El pH es una de las propiedades fisicoquímicas más importante de los suelos; de él depende en gran parte la disponibilidad de nutrientes para las plantas, no solo porque determina su solubilidad sino porque controla el tipo de actividad biológica y, por lo tanto, la mineralización de la materia orgánica. También, tiene efecto sobre la concentración disponible de iones y sustancias tóxicas, la capacidad de intercambio catiónico de suelo y otras propiedades importantes. (ICONTEC, 2008b)

#### 6.4.5 Determinación de la conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica corresponde al contenido de electrolitos presentes en el suelo que son solubles en el agua y es un indicador de la salinidad del suelo.

El principio que rige el método conductivimétrico se basa en que el agua es un conductor muy pobre de la electricidad, pero cuando tiene sales disueltas puede conducirla en proporción directa a la cantidad de sales presentes. Por esta razón la conductividad eléctrica del extracto de saturación es un indicador útil de la salinidad del suelo. A su vez, la conductividad eléctrica de las soluciones acuosas salinas aumenta a medida que aumenta la temperatura (aproximadamente 2.0 % por cada grado Celsius); por lo cual se hace necesario hacer referencia a una temperatura patrón de 25.0 °C mediante factores de corrección.

La conductividad puede ser corregida mediante la fórmula (American Public Health Association, 1995):

*Ecuación 2 Ecuación de corrección de conductividad.*

$$k, \left( \frac{mS}{m} \right) = \frac{k_m}{1 + 0.0191(T - 25^{\circ}C)}$$

Donde  $K_m$  es la conductividad medida, y T la temperatura en grados Celsius.

## **7. Metodología, resultados, análisis y conclusiones.**

### **7.1 Metodología**

La metodología que se utilizó para la determinación de las características de los agregados se describe a continuación mediante diversas etapas: inicialmente una etapa de recolección, selección y preparación de la muestra, luego se describe el diseño de experimento utilizado en la investigación y los parámetros que se analizaron en los agregados.

#### **7.1.1 Recolección, selección y preparación de muestras**

Las muestras de este proyecto fueron obtenidas de residuos de concreto de una vía de alto tráfico y una edificación, a las cuales se les tomo una fracción representativa y se trituro en la planta trituradora de Ingecost SA. Estas fueron recolectadas de envases plásticos tapados donde se distribuía la muestra de cada uno de los agregados en 4 tanques plásticos tapados de los cuales 3 de los 4 tanques correspondían a fracciones gruesas y un tanque a la fracción fina. Estas muestras hacen parte del proyecto “Desarrollo de una metodología de diseño de mezclas asfálticas tibias con la inclusión de materiales pétreos provenientes de concretos reciclados” de la Universidad del Norte & Colciencias.

Los residuos de concreto de la edificación provienen de la demolición del Estadio Tomas Arrieta, que fue un escenario deportivo dedicado a la práctica del béisbol, localizado en la intersección de las carreras 54, la calle Murillo y la Vía 40 del barrio Montecristo en Barranquilla; mientras que los residuos de concreto de la vía de alto tráfico son de la vía Hamburgo donde se tomó 1 Km de vía que inician en la glorieta de la carrera 38 con la calle 6 y se extiende hasta la

carrera 30, que da acceso a la zona portuaria de la ciudad de Barranquilla en el departamento de Atlántico. Estos residuos se llevaron a la trituradora de la empresa Ingecost, ubicada en el corregimiento de Arroyo de Piedra (Atlántico), de donde se obtuvieron 1700kg de cada una de las muestras mediante un muestreo aleatorio. La muestra de agregado pétreo natural se solicitó a la empresa Ingecost, esta proviene de la cantera y planta de extracción ubicada en el km 56 de la vía Cordialidad en el mismo corregimiento de Arroyo de Piedra.

Las muestras de agregados naturales fueron preservadas en tanques de polietileno de color negro con tapa. La muestra corresponde a 1700 kg de material previamente triturado. Dichas muestras no tienen una granulometría específica, se les realizó trituración y clasificación para obtener una granulometría acorde a la recomendación de la normativa colombiana para la construcción del INVIAS, según la especificación MDC-25 para los agregados para pavimentación asfáltica.

Las muestras corresponden a:

- Residuos de concreto de la demolición del estadio de béisbol Tomas Arrieta.
- Residuos de concreto de la demolición de la vía Hamburgo.
- Agregados naturales provenientes de la cantera de la empresa Ingecost ubicada en el departamento de Atlántico.

La selección y preparación de la muestra se realizó mediante la NTC – ISO 11464. Se modificó la parte de exclusión de las gravas para hacerlas parte de la muestra. También se efectuó una clasificación de las muestras de agregados, tomando como referente la técnica de gradación MDC–25 para la obtención de las muestras en los distintos rangos de tamaño proporcionado por

la MDC-25; luego se evaluó cada una de las fracciones de cada pasa tamiz con la metodología y ensayos seleccionados.

Las muestras se mantuvieron guardadas en envases de polipropileno selladas y libres de contaminación con el medio. Para cada análisis de cada muestra se realizaron dos réplicas.

Las preparaciones adicionales a las muestras dependieron del tipo de análisis que fue practicado y se describen en la metodología al igual que la normativa técnica elegida para el análisis.

### 7.1.2 Diseño de experimento

Tabla 16 Diseño de experimento, en este diseño se analiza cada rango de tamaños del agregado tomando como referente los tamices indicados por la metodología de la MDC-25, estos análisis se aplican a 3 muestras de cada rango de tamaños de cada material.

#### *Diseño de experimento I*

<b>Diseño Factorial 2 elementos</b>						
<b>Factor</b>		<b>Tratamiento</b>	<b>Replicas por análisis</b>			<b>Total</b>
<i>Tipo de Agregado</i>	Tamaño del agregado		# de muestras	Original	Replicas	
ACRE	Separación acorde a MDC - 25 (Invías)	Selección de muestra aleatoria. Recolección de muestra en tanques de preservación. Tamizaje mediante MCD-25.	9	1	2	27
	Separación acorde a MDC - 25 (Invías)	Separación de muestras en bolsas selladas de polietileno. Reducción de tamaño según tipo de ensayo requerido (sin reducción. Reducción malla 12 & malla 200)	9	1	2	27
ACRV	Separación acorde a MDC - 25 (Invías)	Separación de muestras en bolsas selladas de polietileno. Reducción de tamaño según tipo de ensayo requerido (sin reducción. Reducción malla 12 & malla 200)	9	1	2	27
	Separación acorde a MDC - 25 (Invías)	Separación de muestras en bolsas selladas de polietileno. Reducción de tamaño según tipo de ensayo requerido (sin reducción. Reducción malla 12 & malla 200)	9	1	2	27
AN	Separación acorde a MDC - 25 (Invías)	Separación de muestras en bolsas selladas de polietileno. Reducción de tamaño según tipo de ensayo requerido (sin reducción. Reducción malla 12 & malla 200)	9	1	2	27
	Separación acorde a MDC - 25 (Invías)	Separación de muestras en bolsas selladas de polietileno. Reducción de tamaño según tipo de ensayo requerido (sin reducción. Reducción malla 12 & malla 200)	9	1	2	27
Número total de muestras por ensayo.						81

En el diseño se consideraron 2 factores de variación, los cuales son: el tipo de agregado conformado por Agregado de Concreto Reciclado de Edificio (ACRE), extraído de la demolición realizada al estadio Tomas Arrieta, el Agregado de Concreto Reciclado de Vía (ACRV), placas de un sector de la avenida Hamburgo, y el Agregado Natural (AN), proveniente de una cantera en la costa atlántica y suministrado por Ingecost. El segundo factor de análisis corresponde al tamaño del agregado; para el fraccionamiento de la muestra según la relación de tamaños de los agregados se utilizó la MDC-25 de agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua, que hace parte de las normas y especificaciones del INVÍAS para la construcción de la franja

granulométrica. Se obtuvieron 10 posibles franjas tamaños comprendidos por los tamices utilizados mediante la MDC-25. Las franjas comprenden los tamaños de pasa tamiz desde el de 1 ½ pulgadas hasta el N° 200 (partículas de tamaño inferior a 0.075 micras).

El gráfico 1 y la tabla 17 contienen la información de la curva granulométrica de los agregados. Esta curva está basada en la MDC-25 de INVIAS.

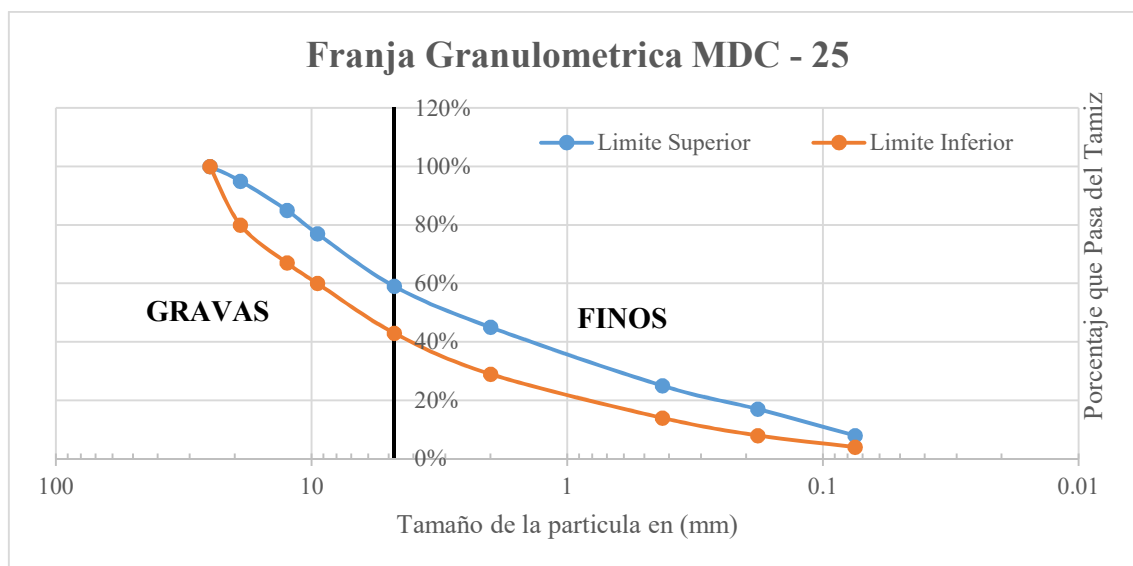


Grafico 1 Franja Granulométrica MDC-25

Tabla 17 Franja Granulométrica DMC-25

Tamiz	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No 4	No 10	No. 40	No. 80	No. 200	Fondo
<b>Diámetro Partícula (mm)</b>	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2	0.425	0.18	0.075	
<b>% Pasa (Max)</b>		100%	95%	85%	77%	59%	45%	25%	17%	8%	
<b>% Pasa (Min)</b>		100%	80%	67%	60%	43%	29%	14%	8%	4%	

### **7.1.3 Parámetros para la caracterización.**

Los siguientes parámetros son los que se utilizarán durante la caracterización de los agregados reciclados de concreto y el agregado natural:

- Componentes químicos principales de los agregados.
- Concentración de los componentes químicos principales de los agregados.
- Determinación mineralógica de las estructuras cristalinas presentes en las muestras.
- Contenido de materia orgánica (%p/p) en las muestras de agregados.
- Contenido de carbono (%p/p) presente como carbón inorgánico en las muestras de agregados.
- Contenido de agua superficial (%p/p) de las muestras.
- Potencial de Hidrogeno (pH) y determinación de características ácidas o básicas de la muestra.
- Conductividad eléctrica de las muestras medida en mS/m (miliSiemens / metro).



#### 7.1.4 Análisis considerados.

Los análisis que se realizaron a las muestras fueron ejecutados con las metodologías enumeradas en la siguiente tabla.

Tabla 18 Metodologías de ensayo.

<i><b>Análisis</b></i>	<i><b>Método.</b></i>
<i>Preparación de muestras de suelo para análisis fisicoquímicos.</i>	NTC-ISO 11464
<i>Espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRFS).</i>	Método de análisis Standardless del equipo propuesto por el fabricante.
<i>Determinación de porcentaje en masa de impurezas orgánicas mediante pérdida por ignición (Loss Of Ignition, LOI)</i>	Metodología utilizada por Dean, 1974; Limbachiya et al., 2007
<i>Determinación de porcentaje en masa de carbón inorgánico mediante pérdida por ignición (Loss Of Ignition, LOI)</i>	Metodología utilizada por Dean, 1974; Limbachiya et al., 2007
<i>Determinación de humedad superficial.</i>	ASTM D 2216-10 (Método A)
<i>Determinación de pH.</i>	NTC 5264-2008
<i>Determinación de conductividad.</i>	NTC 5596-2008 (Método A) / ISO 11265:1994

A continuación se describe la metodología y objeto de cada uno de los ensayos.

##### ***7.1.4.1 Espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRFS).***

Mediante la espectrometría de fluorescencia de rayos x fue posible conocer los compuestos químicos principales en forma de óxidos que conforman las diferentes muestras de agregados, tanto para los agregados reciclados como para el agregado natural.

Este análisis se realizó en la Universidad Pedagógica y Tecnología de Colombia (UPTC) en Tunja, departamento de Boyacá, mediante un Convenio Marco con la Universidad del Norte. Las muestras fueron preparadas con la metodología NTC-ISO 11464, empacadas en bolsas de polipropileno y selladas. Se enviaron rotuladas y codificadas. En la UPTC cada muestra se trituró hasta pasa malla n° 200 (partículas menores a 0.075 milímetros) y se analizaron en el espectrómetro de fluorescencia en forma de polvo compacto sin aditivos aglomerantes.

Una vez en las instalaciones del grupo GIEM de análisis de materiales del edificio INCITEMA se siguió el protocolo interno de la UPTC para la obtención de resultados, siguiendo la metodología Standardless a 18.0 kV, utilizando helio, el tiempo de ensayo por muestra fue de 240 segundos, para la obtención de las diferentes emisiones de onda dada por el material analizado. El equipo utilizado es el Espectrómetro de fluorescencia de energía dispersiva de rayos X (por sus siglas en inglés, EDXRF) de la marca Phillips PANalytical modelo Minipal 2 PW4025 para análisis de espectrometría de fluorescencia de rayos X.

### ***Determinación de porcentaje en masa de impurezas orgánicas mediante pérdida por ignición (Loss On Ignition, LOI)***

Mediante la técnica de pérdida por ignición se obtienen los porcentajes de materia orgánica aproximados en la muestra. Para la determinación de la materia orgánica se realiza una combustión, previo secado de la muestra a 105 °C, a la temperatura de 550 °C por 4 horas, lo que garantiza la combustión de toda la materia orgánica presente (Dean, 1974). Este método ha sido validado por otros estudios, confirmándolo como una forma económica, rápida y aproximada de obtener información de la materia orgánica presente (de L Fong - Lee, Maria. Fernandez Perez, 1983; LacCore, 2013; Salehi et al., 2011)

***Materiales y equipos.***

Durante los ensayos mediante Loss on ignition se utilizaron los siguientes equipos y materiales, estos ensayos se realizaron en el laboratorio de ambiental de la Universidad del Norte.

- Crisoles Cerámicos de 25 mL.
- Dispositivo de muestreo (espátula).
- Campana de desecación.
- Sílica gel.
- Horno de secado (JeioTech Modelo 55L)
- Mufla con capacidad de calentamiento hasta 1200 °C. (Vulcan S, Modelo 550)
- Balanza analítica (Precisa Modelo 180A)

***Procedimiento.***

De acuerdo con el protocolo de preparación de muestras NTC-ISO 11464, la muestra previamente se separó por rangos de tamaño mediante tamizaje; en primera instancia se trituró hasta pasa tamiz n°10 (2.00 mm); y durante los ensayos se logró triturar hasta pasa tamiz n° 16 (1.18mm), y luego se procedió guardarlas en bolsas de polipropileno selladas para evitar contaminación externa o humidificación.

Se pesaron los crisoles limpios y secos en la balanza analítica, se tomó el registro de peso de los crisoles (w1) con 4 decimales después del gramo, y a cada crisol se le agregaron 5.0 gr del material a analizar; paso seguido se tomó registro del peso de material (w2) para cada crisol, y se colocó a secar utilizando la metodología de secado de humedad superficial ASTM D 2216, de 16

a 24 horas hasta conseguir peso constante. Se enfrió el material en la campana de desecación, se pesó en la báscula analítica y se tomó el registro (w3). Se efectuaron los cálculos para deducir las pérdidas por humedad superficial. Luego, se introdujo cada crisol a la mufla y se programó una rampa de temperatura de 20°C, se fijó la temperatura hasta 550°C por 4.0 horas. Después de 4.0 horas a temperatura de 550°C, se disminuyó la temperatura hasta 110°C, y se pasaron las muestras a la campana de desecación, una vez frías se tomó el registro (w4) mediante la balanza analítica. Se introdujeron nuevamente los crisoles a la mufla y se programó la rampa de calentamiento a 20°C y la temperatura a 1000°C por 2.0 horas. Una vez pasaron las 2 horas, se disminuyó la temperatura a 110°C y se finalizó el enfriamiento en la campana de desecado. Una vez fría la muestra se tomó el registro de peso (w5) de cada crisol en la balanza analítica. (de L Fong - Lee, Maria. Fernandez Perez, 1983; Dean, 1974; LacCore, 2013; Salehi et al., 2011)

Mediante las formulas expresadas debajo se calculó los porcentajes de pérdida por ignición.

*Ecuación 3 Ecuación de humedad superficial*

$$\% \text{ de Humedad Superficial} = \frac{w3}{w1 + w2}$$

*Ecuación 4 Ecuación de cálculo de pérdidas por ignición a 550 °C*

$$\% \text{ LOI } 550^{\circ}\text{C} = \frac{w4}{w1 + w2} - \% \text{ de Humedad Superficial}.$$

*Ecuación 5 Ecuación de cálculo de pérdidas por ignición a 1000 °C*

$$\% \text{ LOI } 1000^{\circ}\text{C} = \frac{w5}{w1 + w2} - (\% \text{ LOI } 550^{\circ}\text{C} + \% \text{ de Humedad Superficial}).$$

Se realizaron 2 réplicas a cada ensayo con el fin de establecer con precisión el error del ensayo.

#### ***7.1.4.2 Determinación de humedad superficial.***

La determinación de la humedad se realizó siguiendo la técnica ASTM D2216-10, en la que se estableció el porcentaje de agua en los agregados, se utilizó el método A de la norma y con base a este se seleccionó la masa mínima de la muestra de acuerdo a la distribución promedio de tamaño de partículas a analizar.

#### ***Materiales y equipos.***

- Criterios de cerámica de múltiples tamaños o bandejas de acero inoxidable.
- Horno de secado (Jeiotech Modelo 55L)
- Campana de desecado.
- Sílica gel
- Instrumento de toma de muestra (espátula)
- Balanza con precisión analítica 0.1 mg. (Precisa Modelo 180<sup>a</sup>)
- Balanza con precisión 0.1 g. (Sartorius Modelo 5201-1S)

#### ***Procedimiento.***

Se siguió el procedimiento de la ASTM D 2216-10. En este análisis no se le realizó trituración adicional a los agregados y por ende la NTC 11464 no se emplea en su totalidad para

la preparación de la muestra. Se realizó separación de las fracciones según el tamaño del agregado usando los tamices designados en la MDC-25 y a cada fracción de tamaño se le aplicó secado hasta obtener peso constante, las muestras estuvieron en secado de 18 a 24 horas. Para las muestras de gravas con tamaños de agregado superior a 9.5 mm, el ensayo se efectuó en el Laboratorio de Geotecnia de ingeniería civil. Se emplearon bandejas metálicas y cantidades superiores a las mínimas requeridas en la norma ASTM D 2216-10. Para estas muestras se empleó la balanza con precisión 0.1g.

#### ***7.1.4.3 Determinación de pH.***

La determinación de pH de las muestras se realizó inicialmente preparando las muestras según norma NTC – ISO 11464, paso seguido se determinó el pH siguiendo la metodología de la Norma NTC 5596–2008 (Método A).

#### ***Materiales y equipos.***

- Beaker de 25 ml.
- Equipo multi-parámetro (WTW con sonda de conductividad, pH y Termómetro integrado Modelo Multi 3420)
- Agitadores de borosilicato.
- Herramienta para toma de muestra (espátula)
- Botellas de agua destilada – des ionizada NTC 5264–2008 (conductividad menor a 2 mS/m)

***Procedimiento.***

Inicialmente se preparó la muestra siguiendo los pasos descritos en NTC-ISO 11464. Luego, se realizó el procedimiento descrito en la NTC 5264–2008 método A, aplicando una variante al tamaño de muestra, se utilizaron 10.0 g de muestra en 12.0 mL de agua destilada – des ionizada para la solución (relación 1.0:1.2 debido a que se obtuvo una mezcla muy pastosa con la relación 1.0:1.0 ). La agitación se realizó manual durante 1 hora por intervalos. El tiempo de reposo aproximado fue de 2 horas, y la lectura de pH se hizo aplicando agitación manual hasta la estabilización de la lectura del pH y temperatura. Se realizaron 2 réplicas a cada ensayo por cada rango de tamaños de cada material, y se validó la variabilidad de los resultados.

***7.1.4.4 Determinación de conductividad.***

La determinación de la conductividad eléctrica es un análisis que hace parte del sistema de gestión de la calidad de suelos mediante la NTC 5596. Este análisis se hace mediante métodos conductimétricos, y es aplicable a todo tipo de suelos.

La conductividad eléctrica por definición corresponde al contenido de electrolitos presentes en el suelo que son solubles en agua. Este es un indicador de la salinidad del suelo. (ICONTEC, 2008a)

El método se basa en la pobre conductividad del agua (agua destilada-des ionizada), al tener sales disueltas, puede conducir la electricidad en proporción directa a la cantidad de sales presentes. Debido a esto, el extracto de saturación es un indicador útil de la salinidad presente en el suelo.

El método empleado debe utilizarse con un factor de corrección de la temperatura a 25°C para lo cual es posible usar un equipo medidor de conductividad con ajuste de corrección a la temperatura o efectuar la corrección mediante la formula

*Ecuación 6 Ecuación de corrección de la conductividad eléctrica.*

$$k, \left( \frac{mS}{m} \right) = \frac{k_m}{1 + 0.0191(T - 25^{\circ}C)}$$

Donde  $K_m$  es la conductividad medida, y T la temperatura en grados Celsius.

### ***Materiales y equipos.***

- Beaker de 25 ml.
- Equipo multi-parámetro (WTW con sonda de conductividad, pH y Termómetro integrado Modelo Multi 3420)
- Agitadores de borosilicato.
- Herramienta para toma de muestra (espátula)
- Botellas de agua destilada – des ionizada EN ISO 3696 (conductividad menor a 0.2 mS/m)
- Centrifuga
- Tubos de ensayo
- Pipetas de 20.0 mL



***Procedimiento.***

Se preparó la muestra inicialmente mediante la NTC-ISO 11464, Se realizó el procedimiento mediante la NTC 5596 método A, para conductividad de suelos.

Se empleó una variante al método, se usó 10.0g de muestra y 15.0 mL de agua destilada y des ionizada (relación 1.0:1.5), se realizó agitación manual por 1 hora y se dejó en reposo por un tiempo aproximado de 16 horas, durante el reposo las muestras permanecieron tapadas para evitar evaporación del agua con el aire seco del laboratorio. Luego del reposo se homogenizó la muestra nuevamente y se realizó separación de la fase líquida mediante centrifugación en tubos de ensayo; se extrajo la fase líquida y se realizó conductimetría, utilizando el equipo multiparámetro WTW, se registró conductividad en microsiemens/metro y temperatura en °C. De manera manual se aplicó corrección por temperatura a 25.0°C. Se realizaron 2 lecturas a cada ensayo y sus réplicas correspondientes para validar la variabilidad de la muestra. Se realizaron hasta 4 lecturas cuando la muestra presentó alta variabilidad.

## **7.2 Presentación de los resultados**

Los resultados obtenidos están divididos para cada una de las propiedades medidas, en cada una de las tablas o gráficos se muestran los rangos en los que se aplicaron los ensayos acorde a la MDC-25, para el rango de tamizaje entre 1 ½ pulgada y 1 pulgada, no se encontró material para realizar ensayos dentro de la muestra, indicando que el material de muestreo se encontraba con una granulometría con medidas por debajo de 1 pulgada. A continuación se describen los resultados encontrados para cada parámetro analizado.

### **7.2.1 Espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRFS).**

Después de aplicar el análisis de fluorescencia de rayos x a las diferentes muestras de material de agregados de concreto reciclado y agregado natural se obtuvieron valores representativos de composición para los diferentes rangos de tamaño. Los datos obtenidos representan la composición de los agregados en forma de óxidos ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y sus valores se correlacionan con el rango de tamaños de partícula, delimitado por la retención en los tamices, esta información se encuentra en la tabla 19 y representados en las gráficas 2 a la 11ª continuación se presenta un análisis de los resultados obtenidos.

Tabla 19 Composición química obtenida mediante FRX de ACRE, ACRV y NA expresado en forma de óxidos en %(p/p)

Tipo	Rango de tamaño de agregado (mm)	Resultados de fluorescencia de rayos X expresados en contenido %(p/p) de óxidos.									
		Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ACRE	37.5 - 25.0										
	Gravas										
	25.0 - 19.0	6.90	6.00	8.30	32.70	0.70	1.10	41.00	0.12	0.047	3.09
	19.0 - 12.5	8.00	6.20	8.50	32.00	0.60	1.00	40.70	0.15	0.056	2.71
	12.5 - 9.50	7.40	5.70	9.00	35.80	0.73	1.00	37.00	0.18	0.051	3.11
	9.50 - 4.75	6.10	5.00	8.80	37.20	0.77	1.00	37.60	0.17	0.040	3.33
	4.75 - 2.00	5.80	4.50	10.00	39.30	0.90	1.10	33.60	0.20	0.062	4.10
	Finos										
	2.00 - 0.425	5.20	3.90	12.00	45.40	0.96	1.30	26.00	0.27	0.064	4.82
	0.425 - 0.180	5.70	3.70	10.00	41.90	1.70	1.10	30.60	0.33	0.075	4.52
ACRV	37.5 - 25.0										
	Gravas										
	25 - 19.0	6.50	4.10	8.20	33.50	1.10	0.99	41.60	0.13	0.054	3.79
	19 - 12.5	7.10	5.00	7.70	31.90	0.60	1.10	43.70	0.14	0.050	2.80
	12.5 - 9.50	7.50	5.70	8.00	33.70	0.64	1.10	40.50	0.12	0.040	2.59
	9.50 - 4.75	7.30	4.60	7.50	29.40	0.66	1.00	46.60	0.11	0.040	2.85
	4.75 - 2.00	7.30	4.50	8.30	30.90	0.73	1.00	44.30	0.12	0.040	2.85
	Finos										
	2.00 - 0.425	8.30	3.90	8.90	33.90	0.69	1.10	39.90	0.19	0.048	3.08
	0.425 - 0.180	7.30	3.30	7.90	33.60	1.10	0.95	43.00	0.17	0.000	2.73
AN	37.5 - 25.0										
	Gravas										
	25 - 19.0	5.80	2.70	11.00	47.50	1.40	0.95	24.80	0.29	0.170	5.09
	19 - 12.5	6.20	2.70	12.00	46.10	1.80	1.00	23.90	0.32	0.190	5.75
	12.5 - 9.50	5.30	3.00	12.00	49.80	1.50	0.99	20.90	0.33	0.170	5.72
	9.50 - 4.75	4.50	2.50	13.00	56.10	1.70	1.00	13.80	0.36	0.150	6.84
	4.75 - 2.00	4.80	2.50	13.60	57.10	1.90	1.20	12.40	0.43	0.120	5.91
	Finos										
	2.00 - 0.425	3.70	2.30	12.80	70.90	1.40	1.25	2.75	0.31	0.056	4.56
	0.425 - 0.180	4.00	2.80	13.70	70.00	2.00	1.89	2.27	0.24	0.048	3.16
	180 - 0.075	4.10	2.60	14.10	64.40	3.21	1.41	4.60	0.33	0.073	5.26
	0.075 >	3.00	2.90	14.90	58.70	3.67	1.48	7.11	0.57	0.110	7.17

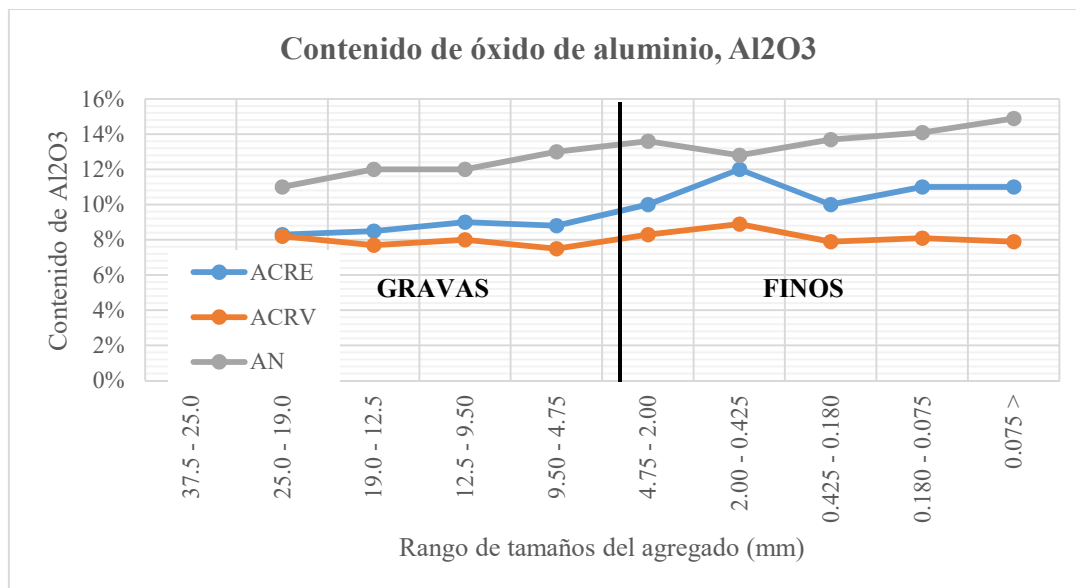
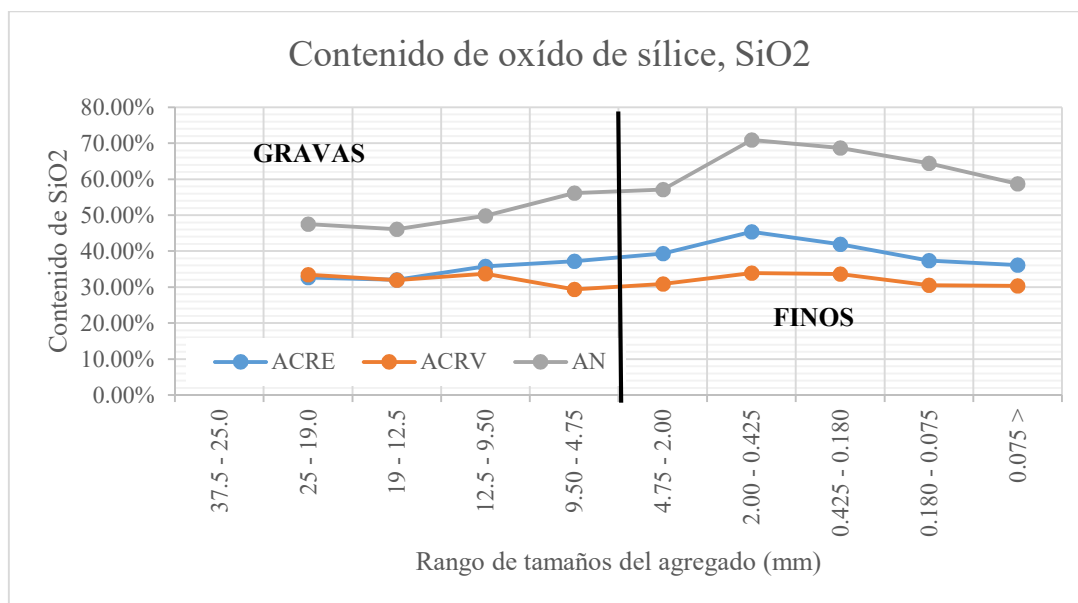


Gráfico 2 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de aluminio (alúmina,  $Al_2O_3$ ) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN

El contenido de aluminio analizado mediante espectrometría de fluorescencia de rayos x, indica un comportamiento casi constante en los diferentes tamaños de agregado para el ACRV, y ligeras tendencias al incremento en contenido de aluminio a medida que disminuye el tamaño del agregado para ACRE y AN. De los tres agregados, AN presenta el mayor contenido en todo el rango de tamaños analizados seguido por ACRE y ACRV.



*Gráfico 3 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de silicio (sílice, SiO<sub>2</sub>) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN*

El contenido de silicio analizado mediante espectrometría de fluorescencia de rayos x, evidencia que los AN cuentan con una proporción mayor de ese elemento. Además, en el rango de 25.0 mm hasta 0.425 una ligera tendencia al aumento de la proporción de sílice a medida que el tamaño del agregado disminuye, para los tamaños más finos la tendencia disminuye, siendo la muestra entre 2.00 mm y 0.425 mm la de mayor proporción de sílice. El mismo comportamiento de los AN también se observa para ACRE. Para ACRV la proporción se mantiene relativamente constante en todo el rango de tamaños analizados.

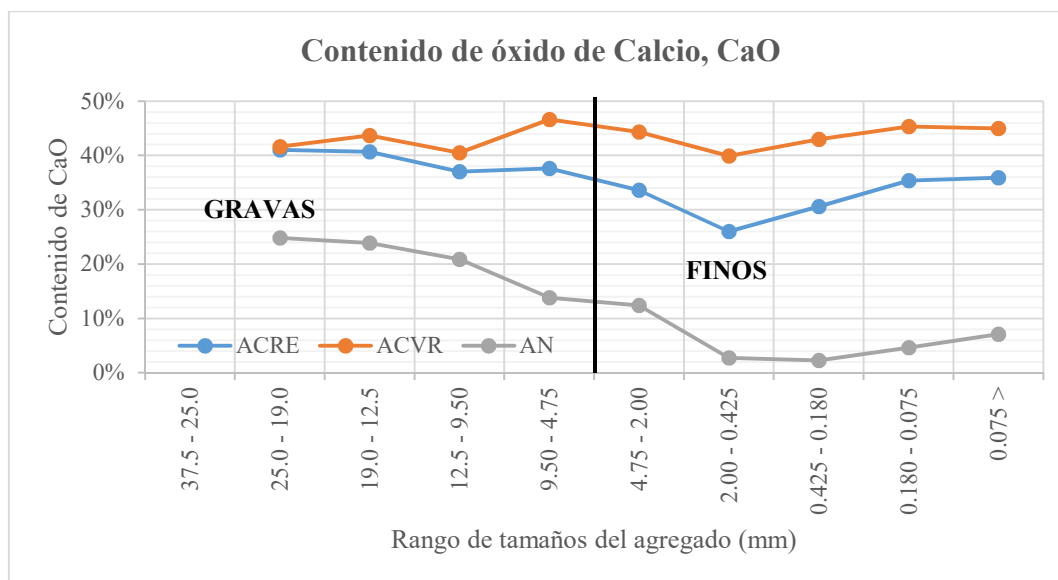


Gráfico 4 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de calcio (cal, CaO) en porcentaje de peso (% p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACVR y AN

El contenido de calcio analizado mediante espectrometría de fluorescencia rayos x, reveló que la proporción de calcio en ACVR se mantiene dentro de un rango de 38 % y 48 % con un comportamiento oscilatorio para los rangos de tamaño entre 25.0 mm y 0.075 mm. Mientras que la proporción para ACRE varía entre 42 % y 26 % un rango más amplio que ACVR, en este material se observa entre el rango de tamaños de 25.0 mm y 0.425 mm una tendencia a disminuir la proporción de este material, para tamaños inferior la tendencia se invierte.

El agregado natural cuenta con una proporción de calcio más baja que los reciclados, y una clara tendencia a disminuir el contenido de calcio a medida que el tamaño del agregado disminuye. Entre 25.0 mm y 0.425 mm la tendencia tiene gradiente negativo desde 24.8 % hasta 2.75 % y entre 0.425 mm y 0.075 mm, hay una ligera tendencia al aumento de 2.75 % a 7.11 %

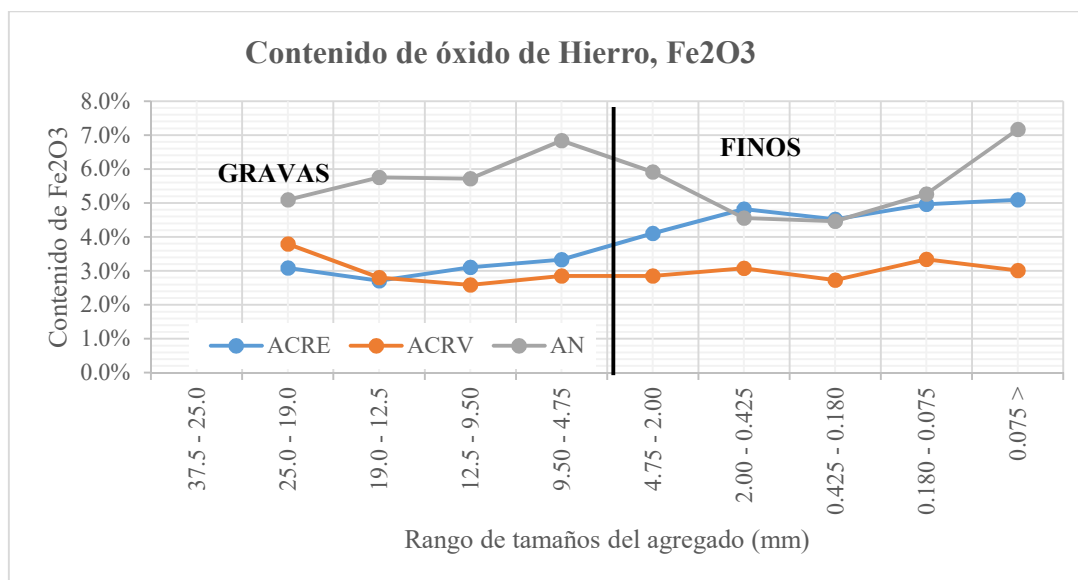


Gráfico 5 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en porcentaje de peso (% p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN

El contenido de hierro analizado mediante espectrometría de fluorescencia rayos x muestra en el gráfico 5 el comportamiento para los agregados reciclados y el agregado natural. El ACRV muestra una tendencia casi constante en el rango de tamaños de 25.0 mm hasta partículas menores de 0.075 mm en este rango los valores se mantienen entre 3.79 % y 2.59 %. Mientras que ACRE evidencia una tendencia a aumentar el contenido de hierro a medida que el tamaño del agregado disminuye.

El agregado natural (AN) en el rango de 25.0 mm a 4.75 mm muestra una tendencia a incremento de hierro entre 5.09 % y 6.84 % a medida que el tamaño de agregado disminuye, en el rango de 4.75 mm a 0.180 mm la tendencia se invierte entre 6.48 % y 3.16 %, vuelve nuevamente a una tendencia de incremento entre 3.16 % y 7.17 % para los tamaños comprendidos entre 0.180 mm y menores de 0.075 mm.

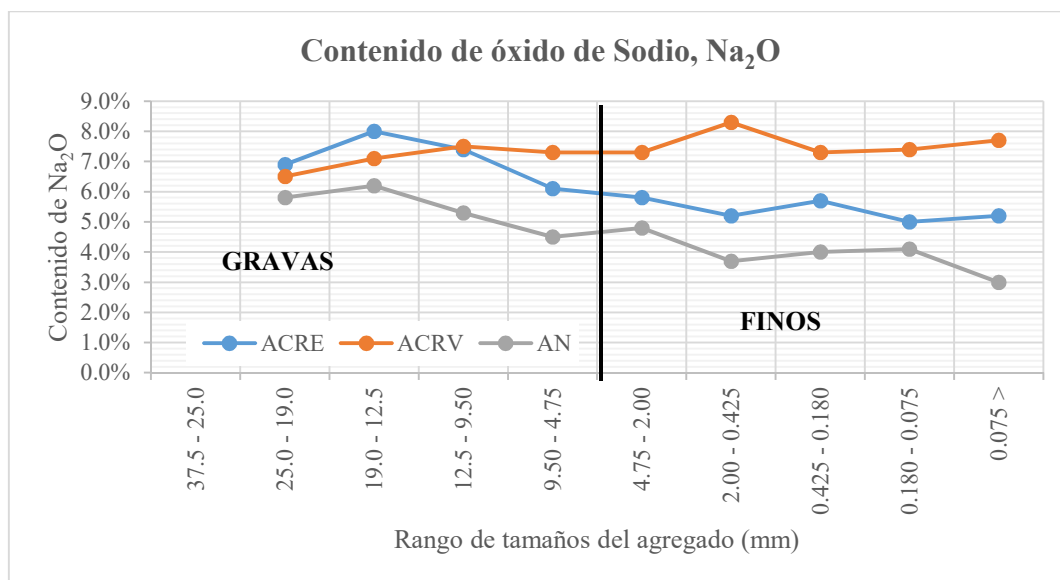


Gráfico 6 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de sodio (Na<sub>2</sub>O) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN

El contenido de sodio analizado mediante espectrometría de fluorescencia rayos x indica que ARCV tiene una ligera tendencia al incremento en la proporción de sodio a medida que el tamaño disminuye, el rango de estas proporciones esta entre 6.50 % y 8.30 %, siendo el punto más alto el material de tamaño entre 2.00 mm y 0.425 mm.

El agregado natural y ACRE presenta tendencias similares de gradiente negativo, donde se muestra tendencia a disminuir la proporción de sodio a medida que el tamaño del agregado disminuye. Para ACRE esta tendencia se mueve entre 8.00 % y 5.00 %. Mientras que AN entre 6.20 % y 3.00 %.

De todos los agregados el que presentó mayor cantidad de sodio fue ACRV, siendo solamente superado por ACRE en los tamaños de agregado de 19.0 mm a 12.5 mm, la menor proporción de sodio fue para el agregado natural.



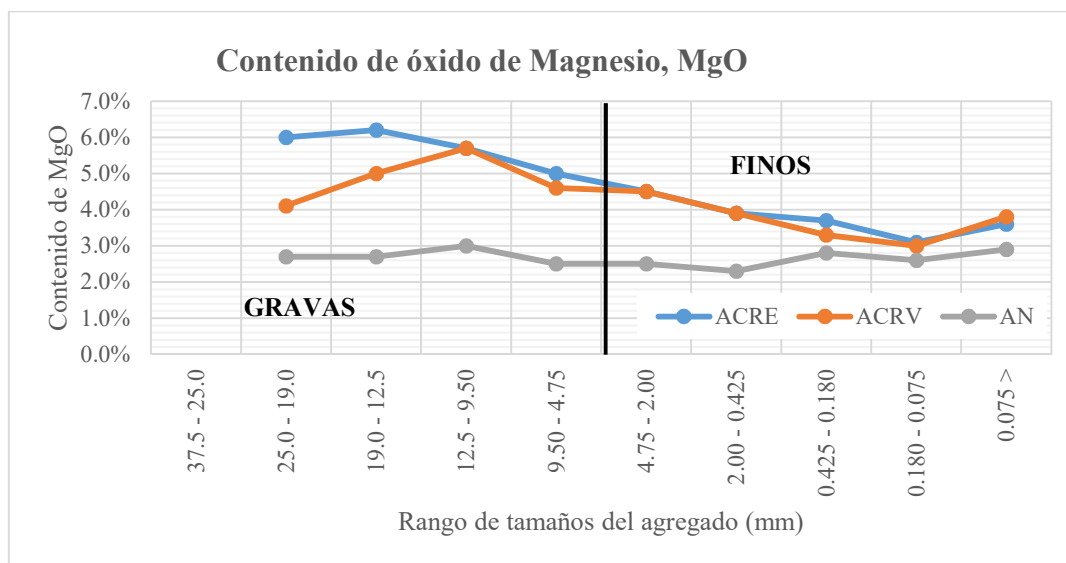


Gráfico 7 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de magnesio (Magnesia, MgO) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN

El contenido de magnesio analizado mediante espectrometría de fluorescencia rayos x se comportó de manera similar en ambos agregados reciclados, presentando un comportamiento muy similar en el rango de tamaños entre 12.5 mm y menores a 0.075 mm, en el rango de proporción de 5.70 % a 3.00 %. Para los tamaños entre 25.0 mm y 12.5 mm la proporción de magnesio fue mayor para ACRE que ACRV. Para los tamaños correspondientes a la fracción de gravas, los agregados reciclados superan entre el 50 % y 100 % el contenido de magnesio de AN.

El agregado natural mostró un comportamiento constante en la franja de proporción de 2.90 % a 2.30 % en todo el rango de tamaños analizados.

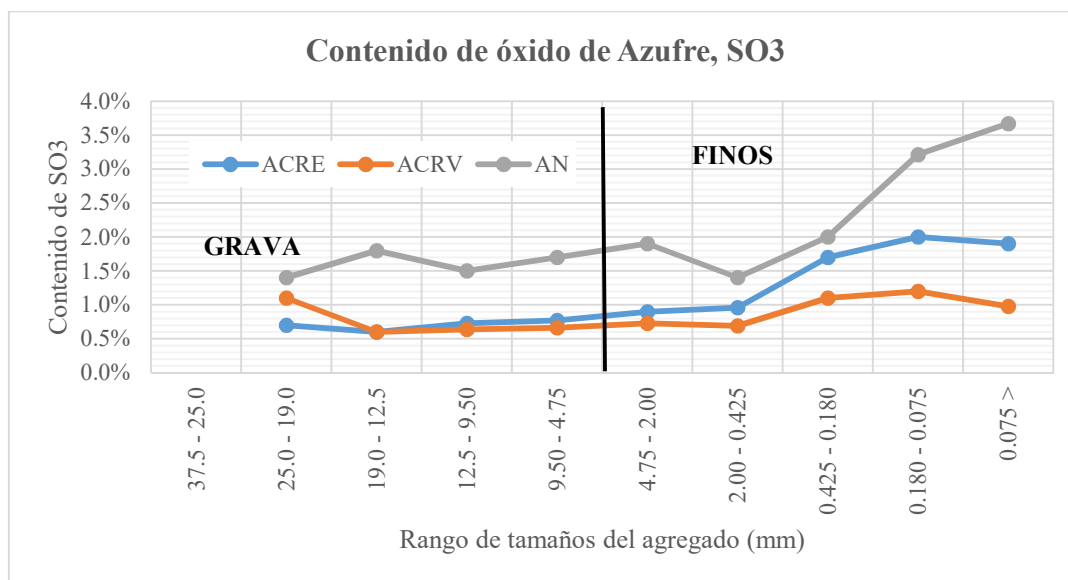


Gráfico 8 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN

El contenido de azufre analizado mediante espectrometría de fluorescencia rayos x, reveló que entre el rango de tamaños comprendido entre 25.0 mm y 0.425 mm para ambos agregados reciclados la proporción de azufre se mantiene entre el rango de 0.6 % y 1.1 % aumentando en ambos agregados reciclados en los tamaños inferiores a 0.425 mm siendo mayor para ACRE, la cual alcanza su máximo de 2.00 % en el rango tamaños de 0.180 mm a 0.075 mm. ACRV, a pesar que también aumenta la proporción de azufre para muestras de agregados menores de 0.425 mm. La proporción es menor que ACRE, llegando a un máximo de 1.20 % para los agregados de tamaño entre 0.180 mm y 0.075 mm.

El contenido de azufre en el agregado natural es mucho mayor que en los agregados reciclados. En el rango de tamaños entre 25.0 mm y 0.425 mm se comporta de manera oscilatoria constante en un rango de proporción de 1.40 % a 1.90 %. Para los tamaños inferior a 0.425 mm se

observa una tendencia de incremento de la proporción de azufre hacia los tamaños menores, llegando a alcanzar un máximo de 3.67 %.

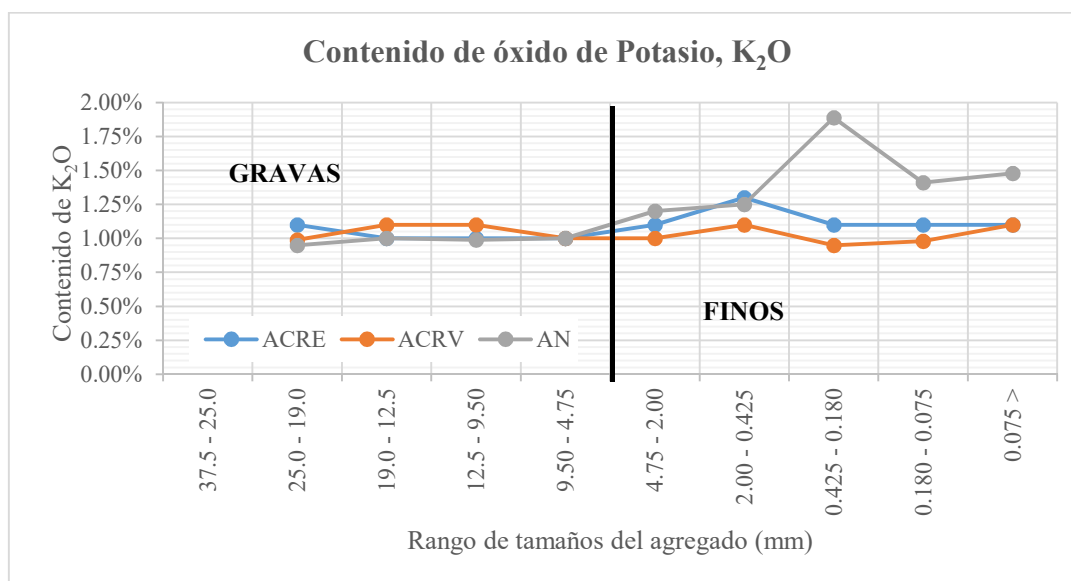


Gráfico 9 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de potasio ( $K_2O$ ) en porcentaje de peso (% p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN

El contenido de potasio analizado mediante espectrometría de fluorescencia rayos x indicó un comportamiento constante en la franja de proporción entre 0.95 % y 1.30 % para todos los agregados analizados (ACRE, ACRV y AN). Este comportamiento se mantiene para los agregados reciclados en todos los tamaños de agregados, pero no para el agregado natural, el cual muestra un incremento en el contenido de potasio que alcanza su máximo de 1.89 % en la franja de tamaño entre 0.425 mm y 0.180 mm.

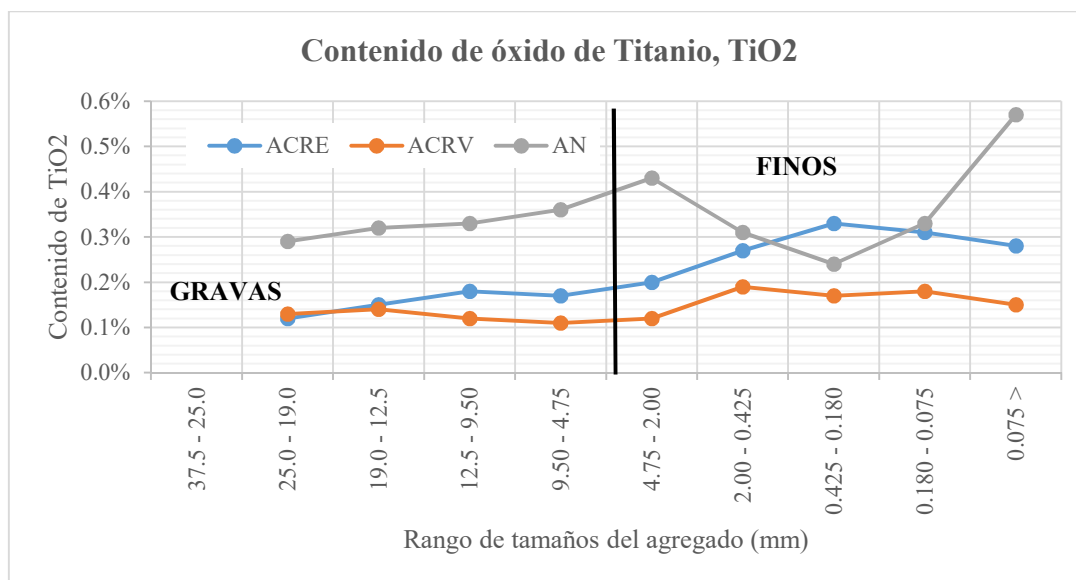


Gráfico 10 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN

El contenido de titanio analizado mediante espectrometría de fluorescencia rayos x en forma de óxidos, indica un mayor contenido de este compuesto para los agregados naturales, encontrándose entre el rango de 0.24 % y 0.57 %, no hay una tendencia lineal clara para este agregado; sin embargo al separarlo en 3 partes es posible observar que entre 25.0 mm – 2.00 mm hay una ligera tendencia a incrementar el contenido de titanio con la disminución del tamaño del agregado. Esta tendencia se invierte entre 4.75 mm y 0.180 mm y regresa nuevamente para los tamaños más finos que 0.180 mm, en este último rango el incremento es mayor que en los anteriores.

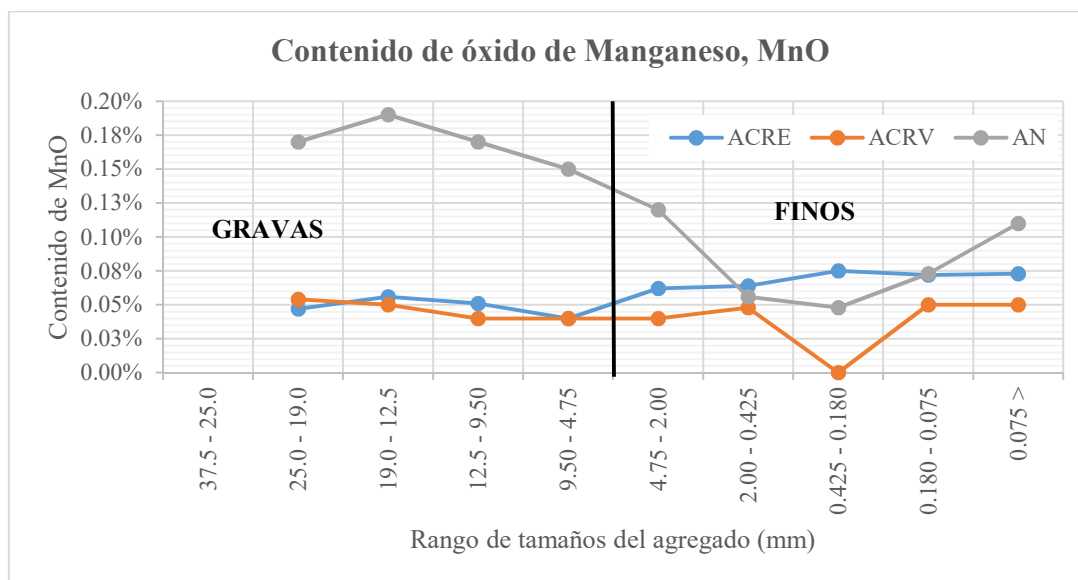


Gráfico 11 Resultados del ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos X para obtención de contenido de óxido de Manganeso (MnO) en porcentaje de peso (%p/p) en relación al tamaño de la partícula de agregado, para ACRE, ACRV y AN

El contenido de manganeso analizado mediante espectrometría de fluorescencia rayos x en los agregados reciclados presenta similitudes en los rangos de tamaño comprendido entre 25.0 mm y 0.425 mm, para ACRE y ACRV se mantiene constante dentro del rango de 0.040 % y 0.064 %. Para tamaños más finos, ACRE aumenta la proporción de manganeso mientras que se mantiene constante para ACRV.

Para el agregado natural la proporción de manganeso es más alta, también se observa una tendencia a disminuir el contenido de manganeso que es proporcional al tamaño del agregado, siendo 0.190 % el máximo alcanzado y 0.048 % el más bajo.

### 7.2.2 Humedad superficial.

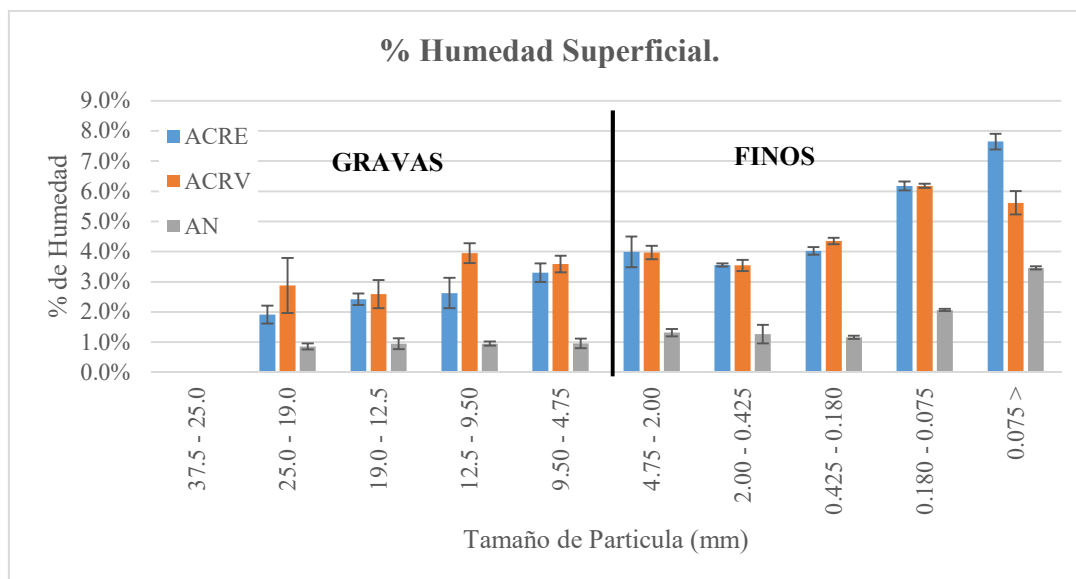


Gráfico 12 Resultados de ensayo de humedad superficial llevados a cabo mediante el método ASTM D 2216-10 (Método A), a los agregados reciclados de concreto de edificación (ARCE), vías (ARCV) y el agregado natural (AN).

En ensayo de humedad superficial realizado mediante la metodología ASTM D 2216-10 se encontró para los agregados reciclados de concreto de edificación que su humedad va desde 1.92 % hasta 7.65 %. Este material muestra un aumento de la humedad superficial a medida que el tamaño de la partícula disminuye siendo la humedad superficial mayor en aquellas partículas que pasaron el tamiz N°200. Para los agregados reciclados de concreto de vías, el rango de humedad superficial va de 2.59 % hasta 6.18 %, siendo la menor humedad para las partículas contenidas entre el tamiz  $\frac{3}{4}$  y  $\frac{1}{2}$  de pulgada y la mayor para aquellas entre el tamiz N° 80 y N° 200. En este caso la correlación con el tamaño de la partícula no completamente directamente proporcional. El agregado natural mostró un rango de variación de humedad menor que los agregados reciclados, siendo este entre 0.86% hasta 3.46%, para las partículas más grandes contenidas entre tamiz 1 y  $\frac{3}{4}$  de pulgada y las partículas menores que pasaron por el tamiz N° 200; para este material también

se apreció una relación directamente proporcional entre la humedad superficial y el tamaño de los agregados contenidos entre los tamices.

### 7.2.3 Determinación de porcentaje en masa de impurezas orgánicas mediante Loss Of Ignition (LOI 550°C)

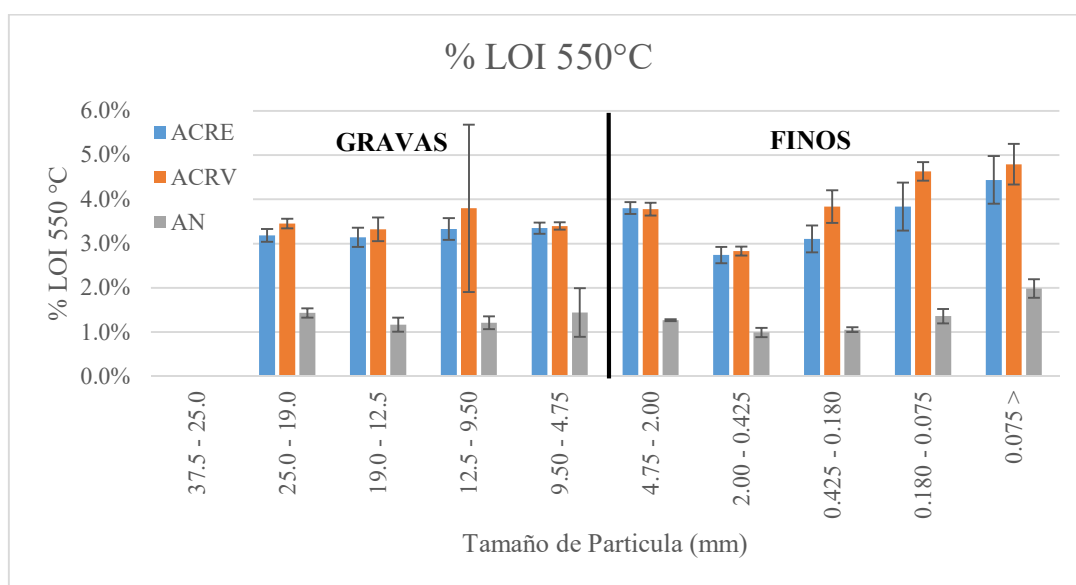


Gráfico 13 Resultados de ensayo de porcentaje de pérdidas por ignición (Loss On Ignition) a 550°C, utilizando la metodología utilizada por Dean, 1974; Limbachiya et al., 2007 en agregados reciclados de concreto de edificación (ARCE), vías (ACRV) y el agregado natural (AN).

Los resultados encontrados para el ensayo de *pérdidas por ignición* a 550 °C para los diferentes agregados muestran un comportamiento similar entre los agregados reciclados de concreto y a su vez un mayor porcentaje LOI 550 °C para los agregados reciclados de concreto que para el agregado natural. Para ARCE el rango de LOI 550 °C estuvo entre 2.74 % y 4.44 %, estos valores corresponden a los tamaños retenidos entre tamiz N° 10 y N° 40 y para las partículas

que pasaron el tamiz N° 200. No se aprecia una correlación entre el tamaño y el porcentaje LOI 550 sin embargo para los tamaños contenidos entre los tamices de 1.0 pulgadas y N° 4, el rango de variación de LOI 550 °C se mantuvo casi constante entre 3.14 % y 3.35 %, existiendo una alta variación entre tamiz N° 4 y N° 80 esta variación fue desde 2.74 % hasta 3.80 % y por último los tamaños que pasan por el tamiz N° 80 presentan valores altos de 3.84 % hasta 4.44 %. El material ARCV presenta un rango similar desde 2.83 % hasta 4.79 %, con características muy similares entre tamiz 1.0 pulgadas y N° 10 con un rango entre 3.32 % y 3.80 %, en el rango de polvos que pasaron por tamiz N° 80 aumentan el rango entre 4.63 % y 4.79 %. El Agregado Natural (AN) presentan valores más bajos con un rango entre 0.99 % y 1.98 %, y con características similares según el tamaño del agregado entre 1.17 % y 1.44 % para el rango comprendido entre 1.0 pulgada y tamiz N° 10. Y para partículas que pasan el tamiz N° 200 un valor mayor que llega a 1.98 %.



### 7.2.4 Determinación de porcentaje en masa de carbón inorgánico mediante Loss Of Ignition (LOI 1000°C)

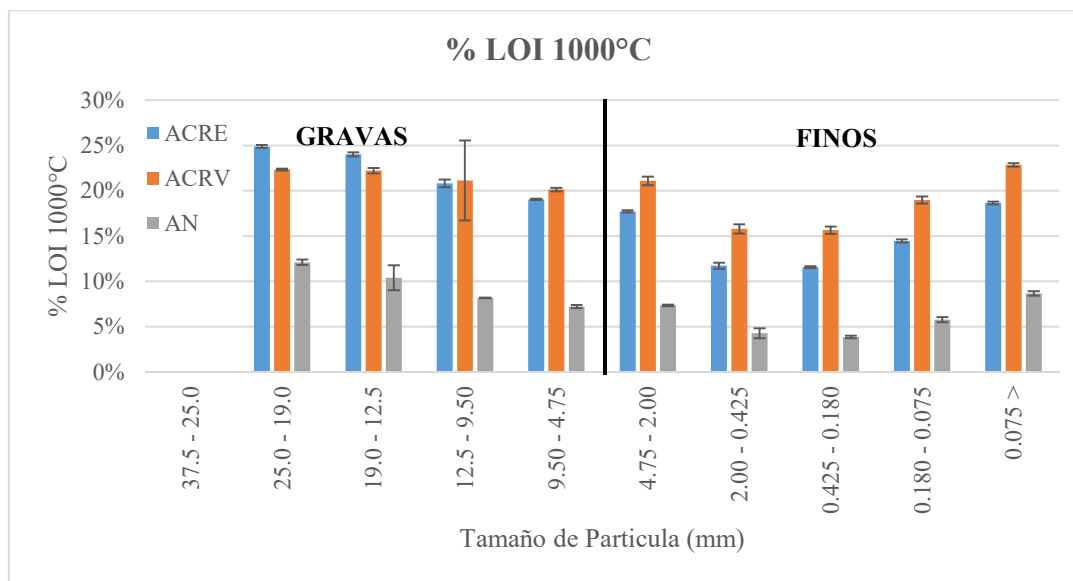


Gráfico 14 Resultados de ensayo de porcentaje de Loss On Ignition a 1000°C llevados a cabo mediante la metodología utilizada por Dean, 1974; Limbachiya et al., 2007, en agregados reciclados de concreto de edificación (ARCE), vías (ARCV) y el agregado natural (AN).

Se observa en los resultados que los agregados reciclados presentan valores mayores que los agregados naturales en todas las mediciones de LOI 1000 °C, estos valores oscilan entre 17.73 % y 24.90 % para ARCE y ARDE en el rango de tamaños de 1.0 pulgadas hasta tamiz N° 10, siendo el rango de ARCV menor que el de ARCE, el rango de ARCV es un poco menor variando entre 20.14 % y 22.34 % para el mismo rango de tamaños. Sin embargo, el rango de AN es menor que los agregados reciclados en el mismo rango de tamaños variando de 7.22 % a 12.10 % y el valor promedio de LOI 1000 °C para AN es cercano a la mitad de los agregados reciclados. En el rango de tamaños que cubre los tamices 1.0 pulgada hasta N°10 parece haber una tendencia en cada uno de los agregados a disminuir el % LOI 1000°C con la disminución de tamaño; sin embargo la

tendencia no se mantiene para el rango de las arenas cuyos tamaños que pasan el tamiz N°10, se observa una tendencia de aumento de % LOI 1000 °C a medida que el tamaño disminuye. En esta tendencia se mantiene la característica que el % LOI 1000°C para los agregados reciclados ARCE y ARCV es mayor que AN, siendo el rango de ARCE 11.57 % a 18.65 %, ARCV 15.65 % a 22.86 % y AN 3.86 % a 8.66 % Para este rango de tamaños los agregados reciclados superan en más de 2 veces el valor promedio del agregado natural.

### 7.2.5 Determinación de pH.

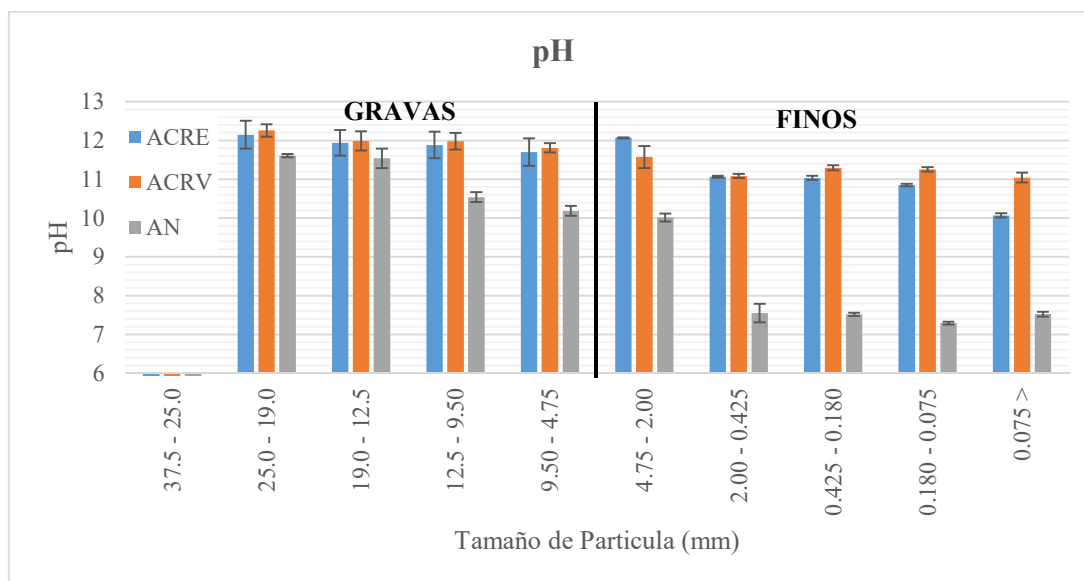


Gráfico 15 Resultados de ensayo de pH llevados a cabo mediante el método NTC 5264–2008, a los agregados reciclados de concreto de edificación (ARCE), vías (ARCV) y el agregado natural (AN).

En ensayo de determinación de pH revelo que los agregados se encuentran en el rango básico – alcalino de pH. En el caso de los agregados reciclados estos se encuentran en el rango entre 10.07 y 12.26, con variaciones y muy próximos entre sí, además de eso se observa una ligera tendencia hacia la disminución del pH cuando el tamaño del agregado disminuye. El agregado natural a diferencia de los reciclados su tendencia es más marcada a disminuir el pH con la disminución de tamaño, y en el rango de arenas y agregado fino (pasa tamiz N° 10) el pH cae al rango de 7.29 – 7.55, este es un rango muy próximo al pH neutro.

### 7.2.6 Determinación de conductividad.

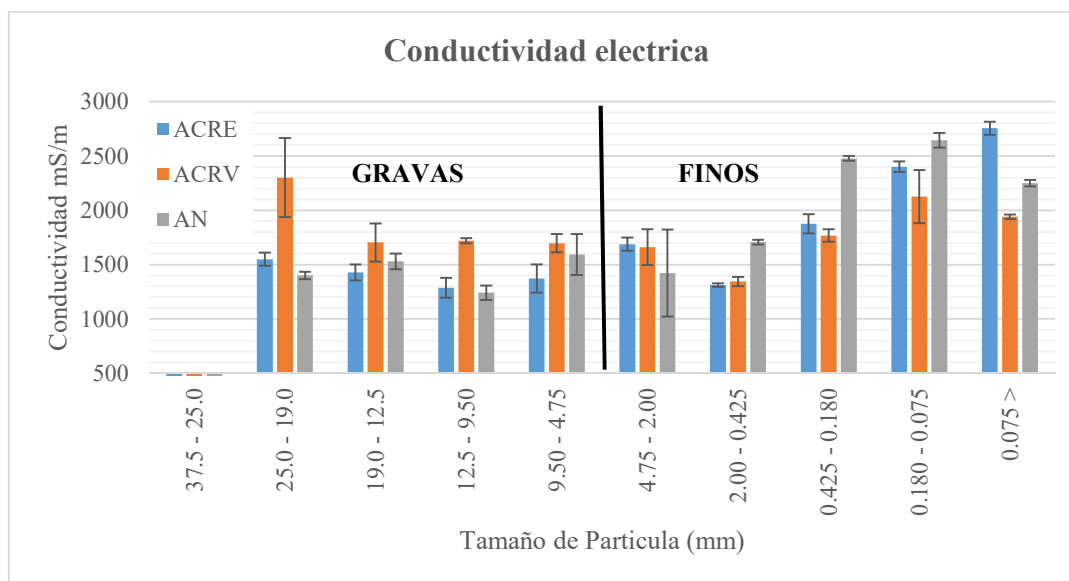


Gráfico 16 Resultados de ensayo de Conductividad Eléctrica llevados a cabo mediante el método NTC 5596–2008 (Método A), a los agregados reciclados de concreto de edificación (ARCE), vías (ARCV) y el agregado natural (AN).

El rango de conductividad de estos agregados comprende un mínimo de 1241 mS/m hasta 2756 mS/m. Este rango comprende los rangos de fuertemente salino (800 mS/m – 1600mS/m) a muy fuertemente salino (Mayor a 1600mS/m). Con excepción de las partículas de ARCV entre 1.0 y ¾ de pulgada y AN entre N°40 y 80, todos los agregados tanto reciclados como el natural presentan una conductividad similar entre 1.0 pulgada y tamiz N° 80 se encuentran en un rango entre 1241 mS/m y 1720 mS/m.

### 7.3 Análisis de los resultados.

De los análisis de espectrometría de fluorescencia de rayos X se destaca el comportamiento de los elementos principales de óxidos de silicio, calcio y aluminio para los agregados de concreto reciclado de vía (ARCV), los cuales se comportan con una tendencia casi constante en todo el rango de tamaños de agregado (grueso y finos). Esto indica una mayor homogeneidad química del material en los diferentes tamaños de partícula que el agregado natural (AN) y el agregado reciclado de concreto de edificación (ACRE) cuyos oscilaron y mostraron relación entre los compuestos químicos presentes y el tamaño del agregado.

Los resultados medidos de humedad superficial se relacionan directamente con valores de absorción obtenidos por (Sanchez et al., 2017), encontrando que la franja fina presenta mayor absorción y humedad para todos los agregados, siendo ACRE la que presenta una absorción y humedad mayor que los otros materiales y supera en más de 3 veces los valores del agregado natural. Los efectos de deterioro de los concretos se atribuye de forma general al incremento en la absorción de agua del agregado, estos parámetros de humedad altos también se asocian con la porosidad del agregado, y la densidad e influye directamente en incremento de la penetración de cloruros los cuales tienen efectos negativos debido a un incremento en la velocidad de la corrosión (Dodds, Goodier, Christodoulou, Austin, & Dunne, 2017). La humedad en pavimentos asfálticos se asocia con un mayor desgaste y deformación, ahuellamiento y agrietamiento debido a que se disminuye el enlace entre en asfalto y el agregado (Fernandes, Fernandes, & Pais, 2017). Para el caso de mezclas tibias de asfalto el impacto de la humedad es aún mayor dado que el efecto de la temperatura en algunos casos no logra afectar la humedad del agregado (Xu, Xiao, Amirkhanian, & Singh, 2017). Xu et al, 2017., indica que las mezclas creadas a partir de agregados de caliza

(mineral de calcio) presentan una mayor resistencia al daño por humedad que las mezclas realizadas con granito o basalto, debido a que la adhesión del asfalto en granito (mineral con alta presencia de sílice, con contenido de aluminatos) o basalto (mineral rico en silicatos de hierro, magnesio y sílice) es débil.

Los agregados reciclados en todo el rango de tamaños muestran un pH alto y fuertemente alcalino. La presencia de hidróxidos como la portlantita (una forma mineral de calcio) provenientes del cemento puede explicar el carácter alcalino de los agregados reciclados, sin embargo el pH alto del agregado natural requiere de un análisis mineral como difracción de rayos x para identificar sus compuestos. Los agregados alcalinos presentan mejor desempeño en cuanto a la resistencia al daño por humedad a diferencia de los agregados ácidos que son mayoría (S. Hesami et al, 2013; P.V. Shivaprasad et al, 2012 & K. Kanitpong et al, 2012, citado en Xu et al, 2017). El agregado natural fino aunque presentó un pH cercano a la zona neutral su humedad y absorción es baja comparado con los ARC.

El contenido de hierro es inferior en los agregados reciclados de concreto que en el agregado natural. Se ha comprobado que el óxido de hierro deteriora la película de asfalto adyacente a él (Herold & Roberts, 2005; Herold, Roberts, Noronha, & Smadi, 2008), catalizando la oxidación del bitumen con el oxígeno del medio (Moschopedis & Speight, 1978).

El contenido de manganeso presente en las gravas de los agregados reciclados de concreto es mucho menor que en el agregado natural. Moschopedis et al, 1978., encontró que las sales de manganeso afectan el asfalto produciendo reacciones de oxidación, conduciéndolo a un envejecimiento y posterior deterioro. Cabe resaltar que el contenido de manganeso presente en los RCAs no supera 0.075%, siendo esta la mayor concentración, encontrada solamente en el agregado fino. En esta parte fina los agregados reciclados y naturales tienen contenidos similares de

manganeso. El ACRV mantiene su contenido de manganeso por debajo de ACRE y AN en todos los rangos de tamaño.

La conductividad eléctrica de los agregados es alta y se encuentra por encima del rango fuertemente salino. La resistividad es el inverso de la conductividad y acorde a las AASHTO T358 los valores de resistividad inferiores a 12.0 k-ohm cm se pueden interpretar como una alta penetración de iones cloruros que puede conducir a tasa de corrosión alta (Reporte técnico 60 de la sociedad de concretos citado en Dodds et al, 2017).

Para el análisis de LOI 550°C, en relación a la proporción de materia orgánica, Dean, 1974., realizó una correlación donde indica que este parámetro corresponde aproximadamente a 50% en peso de la materia orgánica y que el peso perdido restante puede corresponder a una pérdida de agua hidratada de los diferentes compuestos minerales.

En relación al parámetro LOI 1000°C, este presenta altos valores para los agregados reciclados de concreto, dicho parámetro está influenciado por el contenido de agua hidratada así como la formación de carbonatos. Se encontró que la presencia de minerales de calcio es mayor en los agregados reciclados que en AN, y su contenido presenta una relación proporcional con el parámetro LOI 1000% que se evidencia al analizar ambos gráficos 4 y 14, estos presentan un comportamiento similar en cada rango de tamaño de los agregados.

En los finos de los agregados naturales, el incremento de la cantidad de sílice, presenta una relación con el pH de la zona neutral, estos agregados presentan unas características marcadas y distintas a los agregados naturales gruesos, existe la posibilidad de que se trate de un agregado natural de diferente zona de extracción probablemente un mineral ígneo formado por silicatos y aluminatos en su mayoría.

## **8. Conclusiones**

Durante el análisis realizado a los diferentes agregados se encontraron similitudes en la caracterización de los agregados reciclados de concreto y diferencias con el agregado natural que fue utilizado para su comparación. Sin embargo, a pesar de las similitudes que presentan los agregados reciclados, no pueden considerarse iguales, debido a los diferentes comportamientos que ocurrieron durante los análisis efectuados diferenciando los tamaños entre ellos. Así, a manera de conclusión, en el documento se incluyen las siguientes ventajas y desventajas que estos materiales pueden tener en relación con las características estudiadas.

### **8.1 Agregado de concreto reciclado de edificación.**

El agregado de concreto reciclado de edificación mostró tendencias en las concentraciones de la composición química de sus elementos principales, según el tamaño de la partícula analizada.

Los componentes principales  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  representan aproximadamente 70 % en peso, del cual el calcio tiene la mayor presencia en ACRE (fracción gruesa entre 38 % y 41 % en peso, y la fracción fina entre 28 % y 37 % en peso). Seguido por el contenido de sílice (fracción gruesa entre 31 % y el 39 %, y fina entre 36 % y 46 %). En cuanto al de aluminio (fracción gruesa entre 8.2 % y 8.6 %, fina entre 10 % y 12 %), el contenido es más estable. Varios autores destacan el comportamiento que en materia de adherencia con el asfalto tienen los agregados basados en minerales de calcio como las limas y e indican que es mayor a la que proveen minerales ricos en silicio y aluminatos calizas (Hesami, Roshani, Hamed, & Azarhoosh, 2013; Richardson, 2008; Xu et al., 2017) como el AN, cuyo contenido de calcio es menor ( $\text{CaO}$  en la fracción gruesa entre



24.8 % y 13.8 % y entre 12.4 % y 2.27 % en fina), compensado con un contenido de silicio ( $\text{SiO}_2$  entre 47.5 % y 56.1 % en la fracción gruesa y 57.10 % y 70.9 % en la fina) bastante alto. El contenido de aluminio de AN se mantiene entre 11.0 % y 14.9 %. Este precedente indicaría que a mayor cantidad de calcio, este material podría presentar una mayor adherencia y ser menos susceptible al daño por agua, al agrietamiento, desgaste y ahuellamiento en caso de ser utilizado como material de relleno en pavimentos asfálticos. El ACRE, cuya composición química lo ubica en un punto intermedio entre una caliza y un granito, podría presentar características de adherencia mayores que los granitos y menores que las calizas. Sin embargo, ya que este mismo material acusa una menor concentración de calcio en su fracción fina, esto podría representar una menor adherencia con respecto a la fracción de gruesos, y asimismo adherencias mayores al AN tanto en gruesos como finos debido a su composición química.

Otro factor relacionado por Xu et al, 2017., es la adherencia relacionada con el pH, la cual es mayor en agregados alcalinos (como los agregados calizos) y disminuye en agregados con pH neutro o ácido (como los granitos o basaltos, ricos en sílice y aluminatos), factor que puede indicar una mejor adherencia del ACRE en pavimentos asfálticos al compararse con la adherencia de materiales silicios. Esta alcalinidad está relacionada con los hidróxidos de la pasta de cemento contenida en el mortero de ACRE y no con la alcalinidad del agregado natural previamente utilizado en la formulación de ACRE, lo que da incertidumbre y la posibilidad de obtener adherencias diferentes en la superficie del agregado al momento de mezclarse con el bitumen. En cuando a los valores respecto al AN, la alcalinidad es similar en el rango de las gravas, pero AN presenta valores de pH cercanos a neutros lo que indicaría que su pH no favorecería la adherencia y sería más susceptible que ACRE al daño por agua.

Dentro de la estructura de ACRE también figuran materiales formados por sodio y potasio, los cuales relacionan el potencial alcalino de un agregado y su presencia los compuestos de sodio son mayores en los gruesos que en los finos, mientras que los de potasio se mantienen en la franja entre 1.0 % y 1.25 % para los gruesos y los finos. Estos materiales pueden explicar la presencia de hidróxidos, que proveen su característica alcalina y protegen contra la carbonatación de las estructuras haciéndolas menos susceptibles a acidificarse por agentes externos. Sin embargo, la presencia de estos compuestos puede relacionarse también con sales marinas provenientes del entorno donde se encontraba la edificación. Por tanto un análisis de iones solubles permitiría establecer la cantidad de sales de sodio y potasio. Teniendo en cuenta que la absorción es mayor en los finos, estos podrían tener una mayor acumulación de sales que los gruesos; entonces la fracción gruesa contendría menos sales y sería más adecuada para utilizarse como relleno en cementos hidráulicos. Mientras para pavimentos asfálticos Moschopedis et al, 1978., han comprobado que ciertas sales formadas por potasio-cobalto y potasio-hierro pueden oxidar el bitumen lo que provocaría un envejecimiento de la estructura, aunque en este caso las cantidades de potasio son muy similares entre gruesos y finos. Comparados con los AN, los ACRE presentan un mayor contenido de sodio, y ambos presentan una tendencia similar a disminuir el contenido de sodio si se reduce el tamaño de la partícula y la concentración de sodio en el AN resulta entre 1.0 % y 2.0 % menor que ACRE. A su vez, mientras que el potasio es muy similar en la fracción gruesa, en los finos es mayor que ACRE. Pero, esto no es suficiente para concluir si la cantidad de potasio puede causar perjuicios futuros a las estructuras asfálticas, luego es necesario determinar si ese potasio corresponde a iones de sales o a formas minerales.

Respecto al contenido de hierro en ACRE, la concentración de hierro presenta una tendencia de incremento en la medida que disminuye el tamaño de la partícula, lo que muestra mayores

concentración de hierro en los finos (entre 4.1 % y 5.1 %)) respecto a los gruesos (entre 2.8 % y 3.3 %). Sin embargo, la concentración de hierro es mayor en el AN (fracción gruesa entre 5.1% y 6.9 % y fina entre 4.5 % y 7.2 %) que en ACRE. El contenido de hierro en AN puede relacionarse con la presencia de minerales de hierro y no necesariamente con óxidos de hierro, siendo estos últimos causantes de reacción catalíticas en el bitumen, provocando envejecimiento, y deterioro del asfalto (Ebberts, 1942; Herold et al., 2008)

Por su lado, el contenido de magnesio en ACRE es mayor en los gruesos que en los finos, con una tendencia a disminuir la concentración a medida que el tamaño del agregado es menor. En la fracción gruesa el contenido es dos veces mayor que en la fina, mientras que la tendencia a disminuir el contenido hacia los finos lo acerca mucho a la concentración encontrada en los finos de AN. El contenido de magnesio en sí mismo no representa un perjuicio a las estructuras, a menos que se trate de una forma mineral del magnesio llamada periclase la cual en la medida que expande su volumen en presencia de agua, crea tensiones sobre la estructura del agregado (Ye et al, 2015). La determinación de la existencia de periclase puede realizarse mediante análisis de difracción de rayos x, aunque el solo análisis de FRX no es suficiente para determinar una influencia positiva o negativa del agregado sobre futuras estructuras. Un mejor acercamiento sobre el contenido de magnesio y las especies minerales podría lograrse mediante análisis de difracción de rayos x (DRX).

El análisis también confirma que el contenido de azufre es mayor en los finos de ACRE, incluso alcanza concentraciones de 2.0 %, mientras que para los gruesos se mantiene estable alrededor de 0.6 %. También se nota una tendencia a aumentar la concentración de azufre a medida que disminuye el tamaño de la partícula, pero la presencia de este material no implica un perjuicio siempre que sea una forma mineral estable; en caso de tratarse de sales de azufre formadas por

contacto con compuestos ácidos como el ion sulfuro indicaría un alto ataque de un medio ácido a la obra, que pudo haber afectado la estructura, asunto que es necesario comprobar con análisis de iones solubles para el elemento azufre. Por otro lado, el azufre también se encuentra presente en el cemento en forma de yeso, y además, solía utilizarse como acabado de las paredes antes de aplicar pintura. Si las lecturas del FRX correspondiesen, el óxido de azufre como yeso en este material podría afectar el tiempo de fragua y producir fracturas en el concreto una vez se seca la nueva mezcla de concreto. Mientras tanto en el uso con asfaltos la presencia de agua absorbida por el yeso y su lenta liberación podría tener influencia en la susceptibilidad al daño producido por agua en los agregados. El contenido de azufre en ACRE (entre 0.70% y 0.77%) comparado con AN (entre 1.4 % y 1.8 %), en la fracción gruesa, es mucho más bajo. ACRE llega ser 3 veces menor, mientras que en la fracción fina la tendencia de aumento disminuye la diferencia entre AN (entre 1.4 % y 3.67 %) y ACRE (entre 0.96 % y 3.0 %). En resumen el contenido de azufre en los agregados naturales puede deberse a compuestos minerales diferentes a los compuestos agregados a ACRE durante la manufactura de sus componentes y la exposición al medio.

En lo que respecta al manganeso, el contenido de manganeso en ACRE corresponde a valores muy bajos, que podrían ser tomados como trazas, y de los tres materiales evaluados registra la concentración más baja, es decir inferior a 0.05 %. En el análisis de FRX el manganeso se presenta como óxido, pero podría tratarse de minerales o sales. Moschopedis et al, 1978., han demostrado que ciertas sales de manganeso tienen un efecto oxidante en el bitumen, que provoca un envejecimiento al contacto con aire. De presentarse este comportamiento, el efecto por acción del manganeso sería igual tanto en los finos como los gruesos. Los valores de ACRE son menores que AN (entre 0.19 % y 0.15 %) para el manganeso en la fracción gruesa, cuyos valores son 3 veces más altos que ACRE, mientras que en los finos la tendencia de AN (entre 0.12 % y 0.048 %) a la

baja le lleva a tener valores similares a ACRE. Un análisis de DRX permitiría conocer qué tipo de minerales en AN se relacionan con el manganeso, pues no es posible indicar cuál tendría mayor influencia negativa en los asfaltos teniendo solo las concentraciones del elemento.

En materia de humedad, el ACRE (entre 2.59 % y 3.95 %) en la fracción gruesa presentó valores menores que su fracción fina (entre 3.54 % y 6.18 %). Estos valores son bastante altos al compararse con el AN (fracción gruesa con valores cercanos a 0.9%, y la fina entre 1.16 % y 3.46 %). Los valores de humedad de ACRE superan al AN en más de 3 veces en la fracción gruesa y más de dos veces en el caso de la fracción fina. Los valores de humedad alta también están relacionados con la absorción, la cual presentó altos valores entre 6.14 % y 7.14 % para los gruesos y finos de ACRE, respectivamente, mientras que los de AN están entre 1.61 % y 1.91 % para los gruesos y los finos, respectivamente. Estas características de humedad y absorción de los agregados están relacionadas con deterioro de obras de concreto, por debilitamiento del agregado y el aumento del tiempo de fragua y endurecimiento, y que hace la obra más susceptible a la penetración por cloruros y corrosión de las estructuras metálicas que recubre el concreto. Mientras que para los pavimentos asfálticos el exceso de humedad incrementa inicialmente los tiempos de mezcla, la alta absorción aumenta la cantidad de asfalto a utilizar y los costos de obra; además, la susceptibilidad de daño por agua es mayor y, por ende, se puede presentar poca adherencia debido a que el agua evita la correcta adherencia entre el agregado y el asfalto, con los consiguientes problemas de desgaste, ahuellamiento y agrietamiento del pavimento (Xu et al., 2017). Otro de los problemas relacionados con el agua, se produce durante los ciclos de congelación y deshielo, ya que esta dinámica incrementa las tensiones internas de un agregado húmedo, debido a la expansión del agua durante la formación de hielo, y su posterior contracción al volver a su forma líquida. Las anteriores razones hacen que ACRE sea un agregado más susceptible a los daños relacionados con

la humedad y esto conllevaría a que el tiempo de vida útil sea más corto que aquellas obras que utilizan AN.

Al referirnos a la integridad estructural de un agregado consideramos que está relacionada con su contenido de materia orgánica y con el daño que ha recibido en forma de carbonatación, por lo cual se evaluó el ACRE mediante las técnicas de LOI 550 °C y LOI 1000 °C para obtener información de la materia orgánica y los carbonatos contenidos, respectivamente. El análisis para materia orgánica (entre 3.45 % y 3.80 % para los gruesos y 2.83 % y 4.79 % para los finos) reveló cifras que superan de 2 a 4 veces los valores encontrados para el AN (promedio de 1.21 % para la fracción gruesa y entre 0.99 % y 1.98 % para los finos). Este valor es importante debido a los espacios que quedan al degradarse la materia orgánica pueden conllevar a una pérdida de resistencia del agregado y aumentar la susceptibilidad al daño por agua, y la penetración de cloruros. Cuando se evaluó ACRE con LOI 1000°C, se evidenció una alta proporción de carbonatos en comparación a los evaluados en AN. Los valores obtenidos llegan a duplicar los valores de AN en la fracción de los gruesos mientras en los finos se triplican. La alta carbonatación del agregado conlleva un mayor desgaste y debe considerarse que tipo de uso puede asignársele, teniendo en cuenta que el desgaste de ACRE será mayor al del AN.

Por último, la conductividad eléctrica de ACRE indica una alta presencia de sales en este agregado, con una tendencia a aumentar a medida que el tamaño del agregado disminuye, Estos valores son similares a los encontrados para el agregado natural, por ende, no hay diferencias significativas en cuando a la posible cantidad de sales de los agregados. En cuanto al uso potencial de este agregado, su alta conductividad eléctrica se relaciona con una muy baja y estable resistividad eléctrica, haciéndolo susceptible a la penetración de iones cloruros en los concretos, y una alta probabilidad de corrosión en las estructuras metálicas internas. Es necesario realizar a ACRE análisis de

concentración de cloruros para establecer la cantidad de cloruros absorbidos durante su vida útil y establecer el potencial corrosivo que puede tener. Según Chung, 2004., su alta conductividad permitiría utilizar este agregado en aplicaciones de deshielo, suelos antiestáticos, blindaje electromagnético y protección catódica de refuerzos de acero en estructuras de hormigón.

## **8.2 Agregados de concreto reciclado de vías.**

El agregado de concreto reciclado de vía (ACRV) presentó en su composición química poca variación en las concentraciones de los diferentes elementos analizados, ya que muestra escasa diferencia en la composición entre agregados gruesos y finos en toda la franja de tamaños analizados, mientras que los agregados naturales (AN) registraron una marcada tendencia y diferencias entre gruesos y finos. Después de analizar los componentes principales  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , los cuales representan cerca del 80% de su composición total. Las concentraciones de  $\text{CaO}$  (entre 39.9 % y 46.6 %) son mucho mayores a los valores de AN. Así, con estos valores de contenido de calcio es posible que su adherencia al asfalto, a causa de la presencia de este mineral, sea mucho mayor que la del AN. Las concentraciones de silicio rondan un 30 % tanto en finos como en gruesos, mientras que en el AN (entre 46.1 % y 56.1 %) estos valores son mayores y parecidos a los de minerales silicios como el granito, que ha mostrado menor adherencia que las calizas (Xu et al., 2017). El contenido de silicio puede deberse a otros minerales abundantes en este material presentes en la mezcla de concreto de ACRV, por lo cual no se puede garantizar unas características de adherencia uniforme del asfalto sobre ACRV. Sin embargo, A causa de su composición, ACRV podría presentar menos susceptibilidad al daño por agua, mejor adherencia al asfalto que AN, lo cual reduce la posibilidad de ahuellamiento, agrietamiento y desgaste en pavimentos asfálticos. Aunque este comportamiento en su mayoría puede deberse al cemento, que

aporta gran cantidad de calcio a la mezcla de concreto, además de hidróxidos, que le dan una característica bastante alcalina a la mezcla, y que se ve representada en el pH básico y alcalino. Según Xu et al, 2017., los valores alcalinos de pH mejoran la adherencia en asfaltos, y para el caso de ACRV este material cuenta con un pH un poco más básico que AN en la fracción de gruesos. En la fracción de finos el pH se reduce un poco (entre 12 y 11), siendo más altos que los finos del AN (pH promedio= 7.5), que presentan pH cercano a los valores neutros.

Además de los compuestos de silicio, calcio y aluminio existen dentro del agregado otros compuestos cuyos componentes están representados por un porcentaje total menor del 30 % y que le confieren propiedades especiales al agregado, pues dependiendo de su composición y concentración estos pueden representar un beneficio o perjuicio a la obra resultante de la mezcla con estos agregados. En el agregado de concreto reciclado de vías (ACRV) hay cantidades de compuestos formados por sodio y potasio. En el cemento, estos compuestos pueden ser atribuidos al carácter alcalino que posee, y, por ende, la parte de mortero contenido en el agregado reciclado de concreto continuará teniendo un potencial de álcali contenido. Mientras tanto la parte de agregado natural contenido dentro del reciclado puede contener sales o minerales compuestos de sodio y potasio, además de una posible contaminación del medio. Los valores de sodio en ACRV (entre 6.5 % y 8.3 %) se mantienen casi constantes en toda la franja de tamaños, siendo mayores a los que presentaron ACRE y NA. Y para los valores de potasio en ACRV, estos son más bajos que ACRE y AN, siendo posible que existan menos sales de potasio en ACRV, las cuales son perjudiciales para el asfalto acorde a Moschopedis et al, 1978. Aun así, es necesario determinar con exactitud qué tipo de compuestos de sodio y potasio están contenidos dentro de ACRV.

Otro elemento perjudicial puede ser el contenido de magnesio en ACRV (entre 4.10 % y 570 % en los gruesos y 4.50 % y 3.0 % en los finos), el cual es mayor al contenido de AN (2.67 % en



promedio). Lo cierto es que mientras dicho contenido de magnesio no esté relacionado con el mineral periclasa, no representa un perjuicio a obras de hormigón las cuales pueden verse afectadas por la hidratación de la periclasa y el aumento de las tensiones internas en el agregado (Xu et al., 2017)

El contenido de azufre en ACRV (entre 1.1 % y 0.66 % en la fracción gruesa mientras que en la fina esta entre 0.73 % y 1.2 %) es menor, y su tendencia presenta menos variación que AN. El contenido de azufre en el agregado reciclado puede estar relacionado con el yeso que se le agrega al clinker para control del tiempo de fragua y con el contenido de azufre de proveniencia mineral del cemento y de los agregados presentes en el ACRV. La posibilidad de que ACRV tenga un menor contenido de yeso disminuye la probabilidad de futuros problemas de daño por agua en agregados utilizados en mezclas asfálticas y problemas con el tiempo de fragua en concretos hidráulicos.

La concentración de hierro en ACRV se mantiene una tendencia constante, lo que indica que las cantidades de hierro contenidas no dependen del tamaño del agregado. Las cifras encontradas por el análisis FRX revelan cantidades menores de hierro en ACRV (3.0% en promedio) que en AN (parte gruesa entre 5.1 % y 6.8 %, y fina entre 4.5 % y 7.17%). El hierro contenido en estos agregados puede provenir de fuentes minerales, y no necesariamente sean óxidos de hierro causantes de la degradación del asfalto, por lo cual, es necesario confirmar la presencia de minerales, óxidos y sales de hierro mediante análisis adicionales.

El manganeso en ACRV se encuentra en el orden de trazas, alrededor de un 0.050 % en toda la franja de tamaños analizada, mientras que el AN presenta valores más altos (entre 0.15 % y 0.19 % en la fracción gruesa y entre 0.120% y 0.048% en la fina) en la fracción de gruesos con una tendencia a disminuir su concentración a medida que el tamaño disminuye. Este comportamiento

nos indica que hay menos posibilidades encontrar sales de manganeso que contribuyen al deterioro del asfalto, en caso de utilizar ACRV como relleno de cementos asfálticos en comparación con AN.

El factor de humedad es importante, debido a las varias formas de deterioro en las obras con las que se asocia la presencia excesiva de agua en el agregado. El ACRV (fracción gruesa entre 2.59 % y 3.59 % y entre 3.54 % y 6.18 % en la fracción fina) presentó los valores más altos de contenido de agua superficial, que superan varias veces los valores de AN. Además, ACRV presenta una tendencia en la cual la humedad incrementa a medida que el tamaño de la partícula disminuye. Los parámetros de absorción (5.28 % en gruesos y 6.59 en finos) obtenidos por Sánchez et al, 2017., se relacionan con los valores de humedad. Estos valores son mucho más altos que los encontrados para AN (promedio de: 0.93% en gruesos, 1.25% en arenas, y entre 2.07% y 3.46% en finos inferiores a 0.180 mm) e influyen en la susceptibilidad al daño por agua, agrietamiento, ahuellamiento y problemas relacionados con la baja adherencia del agregado al cemento asfáltico, además del aumento del costo de la obra debido a la alta adsorción de asfalto. Adicional a esto, se pueden producir fracturas durante ciclos de congelación del agua contenida, debido a las tensiones que produce la formación de hielo dentro de la matriz de concreto. Este material debido a su humedad y su alta absorción presta una calidad de servicio inferior al AN

En cuanto a la cantidad de materia orgánica presente, los valores obtenidos en el ensayo de LOI 550 °C fueron mayores que AN. Esto nos indica que este material podría presentar problemas al incluirlo en estructuras rígidas dado que al descomponerse la materia orgánica queda un espacio libre donde las tensiones pueden fracturar la estructura produciendo micro-grietas que finalmente lleven a una grieta mayor, por lo cual amenazaría la integridad de estructuras rígidas como el hormigón, pero no ocurriría de igual forma en estructuras más flexibles como el pavimento

asfáltico cuyo cemento asfáltico presenta elasticidad y podría absorber las tensiones generadas por los espacios que deje la materia orgánica al degradarse. La presencia de carbonatos en el concreto debilita la estructura, ya que algunas de las sales formadas por los carbonatos incrementan su volumen al contacto con agua, que producen tensiones dañinas para la estructura. El análisis de LOI 1000 °C muestra que los carbonatos son muy similares en los agregados reciclados, con sutiles diferencias como que el ACRV contiene mayor concentración de carbonatos que ACRE en la fracción fina, pero en la fracción gruesa ocurre lo contrario y ACRE presenta mayor contenido. Esto se refleja también en las pruebas de desgaste a este mismo agregado, realizadas por Sánchez et al, 2017., donde ACRV presenta un desgaste mayor que AN.

La presencia de sales en ACRV es elevada conforme al ensayo de conductividad eléctrica, aunque este análisis puede verse afectado por otro tipo de materiales conductores como metales, algunos de los cuales se vieron reflejados en el análisis de FRX. Los valores de conductividad eléctrica de ACRV son superiores a AN. Estos valores ubican a este material con una alta conductividad eléctrica, como un agregado fuertemente salino, de resistividad eléctrica muy baja y estable, siendo muy susceptible a la penetración de iones cloruros en su matriz de concreto (Chung, 2004; Xu et al., 2017) y por tanto, termina afectando su integridad y resistencia a la corrosión de las estructuras internas de hierro. Es necesario realizar un análisis de cloruros y establecer cuán afectado está el agregado y si al ser utilizado en conjunto con estructuras de hierro, puede facilitar la corrosión de estas debido a su contenido de cloruros ya presente.

Finalmente, al comparar los resultados de ACRE contra los resultados de ACRV, podemos concluir lo siguiente acerca de estos dos agregados:

- El contenido de calcio de ACRV es ligeramente superior al de ACRE. Por lo cual su adherencia debido a su composición puede ser mayor que ACRE y AN. Lo que indica que la influencia en la reducción de daño por agua, desgaste, ahuellamiento y agrietamiento en pavimentos asfálticos puede ser mayor en ACRV que ACRE.
- La composición química de los componentes principales (calcio, silicio y aluminio) es mayor en ACRV que en ACRE, además la composición de ACRV no se ve influenciada por el tamaño del agregado, mientras ACRE presenta tendencias con dependencia del tamaño del agregado.
- Los valores de pH para ACRV y ACRE son similares y se consideran básicos y alcalinos. Estos valores son ligeramente mayores a AN en la fracción gruesa y muy superiores en la fracción fina. Por lo cual, en la franja gruesa la adherencia debido a la alcalinidad sería similar en los 3 materiales y en la franja fina los agregados reciclados presentan una adherencia superior.
- El potencial de álcali debido a los compuestos de sodio es mayor en ACRV que en ACRE y AN, esto puede deberse a un mayor contenido de pasta de cemento en el agregado. Mientras que el contenido de potasio es similar en los gruesos de los tres materiales, siendo superado por AN en la parte fina. Esto indica que la posible afectación a causa de las sales de potasio en el asfalto podría ser igual en los agregados reciclados.
- La concentración de hierro es menor en los agregados reciclados. De estos, ACRV presenta las cifras menores y más estables. Razón por la cual, ACRV puede presentar menor

deterioro en asfaltos producto de las reacciones catalíticas entre el óxido de hierro y el asfalto.

- El contenido de azufre es similar en la fracción gruesa de los agregados reciclados, sin embargo, para los ACRV es menor en la fracción fina. Mientras que el contenido en AN es mayor que los agregados reciclados, este puede deberse a la presencia mineral de azufre debido a la veta de explotación y no a la presencia de yeso como ocurre con los agregados reciclados.
- Según el contenido de manganeso, es indiferente utilizar ACRE o ACRV si se utiliza como remplazo solo la fracción gruesa. es más relevante la decisión de qué parte de la fracción fina utilizar. Dado que el ACRV es ligeramente menor.
- La humedad y absorción de los agregados reciclados supera ampliamente la del AN. Sin embargo, la humedad de ACRE es ligeramente menor que ACRV, a pesar de que su absorción es mayor, al igual que su desgaste, esto indica que ACRE es un agregado reciclado de menor calidad con mayor posibilidad de tener daños generados por agua.
- Los agregados reciclados presentaron altos valores de materia orgánica y carbonatos, en comparación con los del AN. Donde se evidenció que ACRV presentó valores levemente mayores a ACRE. Según He et al, 2016., la constante exposición de las estructuras de concreto al dióxido de carbono del ambiente facilita la carbonatación del hormigón. Lo anterior junto con ciclos continuos de humedad y secado, conlleva a ciclos de cristalización y expansión del carbonato, lo que provoca la aparición de micro-fracturas y debilidad del concreto (He, Tang, Zhao, & Chen, 2016). Teniendo en cuenta que la presencia de carbonatos es mayor en ACRV, se esperaría que su estructura presentará un mayor desgaste con respecto a ACRE. Sin embargo, las pruebas de desgaste realizadas por Sanchez et al,

2017., muestran lo contrario. Lo que sugiere que el desgaste presentado puede estar relacionado con la presencia de otros materiales.

## 9. Recomendaciones

Este estudio es complementario del proyecto “*Desarrollo de una metodología de diseño de mezclas asfálticas tibias con la inclusión de materiales pétreos provenientes de concretos reciclados*” de la Universidad del Norte-Colciencias. Para una visión más completa de las características de los agregados reciclados de concreto analizados es imperativo realizar otros ensayos complementarios con la finalidad de encontrar la influencia de las propiedades químicas y su posible impacto en las propiedades mecánicas en pavimentos asfálticos. Con el fin de correlacionar los resultados encontrados con los posibles beneficios y perjuicios que puedan causar las características fisicoquímicas de ACRE y ACRV es necesario realizar otros ensayos al material que permitan medir el nivel de beneficio y perjuicio que ofrece el uso de cada material como relleno en concreto hidráulico o asfáltico e identificar las condiciones en las cuales se producen esos efectos, teniendo en cuenta la influencia del tamaño de la partícula con lo cual sería posible establecer franjas de uso y destino de aplicación de cada franja de uso.

Recomendamos la realización de análisis de difracción de rayos x para establecer el tipo de mineral contenido en los agregados reciclados y sus cantidades, además de análisis de iones solubles mediante espectrometría UV-visible para identificar sales solubles e iones. De esta forma se pueden establecer y diferenciar los diferentes compuestos de magnesio, manganeso, entre otros, e identificar qué especies de dichos compuestos son las que tienen reactividad con los asfaltos y cuáles no.

Con el fin de identificar el tipo de perjuicio o beneficio que genera la presencia específica de ciertos minerales y elementos presentes, es necesario realizar análisis de microscopía electrónica con acople DRX a la muestra de concreto asfáltico que contiene los agregados

reciclados e identificar dónde y cuáles son los elementos que más perjuicios causan a la matriz asfáltica y de esta manera encontrar formulaciones que permitan optimizar la vida útil de las obras asfálticas. El mismo análisis puede ser utilizado en concretos hidráulicos, para la identificación de grietas y micro-grietas y la presencia de sustancias que pudieron causar estos problemas.

Es posible obtener resultados más precisos para los análisis de carbón orgánico y carbonatos utilizando equipos de análisis total de carbono por lectura infrarroja con los gases de descomposición

Finalmente, las aplicaciones que pueden realizarse con estos agregados son variadas, y dependen de las características encontradas; debido a su alta salinidad y conducción eléctrica este agregado puede ser utilizado para aplicaciones de blindaje electromagnético, protección antiestática, deshielo de carreteras y edificaciones (Chung et al, 2004.), no sin antes identificar el potencial de riesgo a la corrosión de las estructuras mediante un análisis de cloruros. Según sea el tamaño del agregado es necesario considerar su inclusión dentro de la mezcla o preferiblemente reemplazar las fracciones finas con agregados naturales, lo cual permitirá un mayor control de la humedad presente en el agregado y de los fenómenos erosivos que suelen presentarse con humedades altas, como la pérdida de adherencia del mortero, y la facilidad de desprendimiento ante fuerzas de tracción. Así podría incluirse en mezclas de hormigón para el desarrollo de obras que no requieran altas resistencias; la decisión de incluir el agregado reciclado en obras de alta resistencia debe ir acompañada de ensayos que determinen su función para la resistencia deseada. de igual forma en mezclas para pavimento asfálticos es conveniente realizar las pruebas de desgaste, ahuellamiento y resistencia antes de considerar su inclusión en la mezcla, priorizando el uso de agregados reciclados de la fracción gruesa sobre agregados reciclados de la fracción fina y



reemplazándolos con agregados naturales a fin de disminuir el porcentaje de asfalto absorbido por el agregado.

### Lista de referencias

- Ahmadi, M., Farzin, S., Hassani, A., & Motamedi, M. (2017). Mechanical properties of the concrete containing recycled fibers and aggregates. *Construction and Building Materials*, 144, 392–398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.215>
- American Public Health Association. (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. (American Water Works Association, Ed.) (19th ed.). New York: Water Pollution Control Federation.
- Angulo, S. C., Ulsen, C., John, V. M., Kahn, H., & Cincotto, M. A. (2009). Chemical-mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil. *Waste Management*, 29(2), 721–730. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.009>
- ASTM. (2010a). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water ( Moisture ) Content of Soil and Rock by Mass 1 ASTM D2216-10. *ASTM International, West Conshohocken, PA*, (November 1988), 1–7. <https://doi.org/10.1520/D2216-10.N>
- ASTM. (2010b). Standard Test Methods for Loss on Ignition ( LOI ) of Solid Combustion Residues. *Methods*, i, 1–7. <https://doi.org/10.1520/D7348-08.2>
- Bianchini, G., Marrocchino, E., Tassinari, R., & Vaccaro, C. (2005). Recycling of construction and demolition waste materials: A chemical-mineralogical appraisal. *Waste Management*, 25(2 SPEC. ISS.), 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.09.005>
- Blengini, G. A. (2009). Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy. *Building and Environment*, 44(2), 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.03.007>
- Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2015). Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *Journal of Cleaner Production*, 99, 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.012>
- Bui, N. K., Satomi, T., & Takahashi, H. (2017). Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate, 148, 376–385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.084>
- Chung, D. D. L. (2004). Electrically conductive cement-based materials. *Advances in Cement Research*. <https://doi.org/10.1680/adcr.16.4.167.46658>
- de Juan, M. S., & Gutiérrez, P. A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(2), 872–877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012>
- de L Fong - Lee, Maria. Fernandez Perez, H. (1983). Comparación de tres técnicas para analizar materia orgánica en sedimentos nota científica. Retrieved June 25, 2017, from <http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1984-1/articulo180.html>

- Dean, W. E. (1974). Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition; comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Research*, 44(1). Retrieved from <http://jsedres.geoscienceworld.org/content/44/1/242>
- Dodds, W., Goodier, C., Christodoulou, C., Austin, S., & Dunne, D. (2017). Durability performance of sustainable structural concrete: Effect of coarse crushed concrete aggregate on microstructure and water ingress. *Construction and Building Materials*, 145, 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.232>
- Dyson, B., & Chang, N. Bin. (2005). Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling. *Waste Management*, 25(7), 669–679. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.10.005>
- Ebberts, a. R. (1942). Oxidation of Asphalt in Thin Films. *Industrial & Engineering Chemistry*, 34(9), 1048–1051. <https://doi.org/10.1021/ie50393a007>
- European Commission. (2016). Construction and Demolition Waste (CDW). Retrieved February 14, 2017, from [http://ec.europa.eu/environment/waste/construction\\_demolition.htm](http://ec.europa.eu/environment/waste/construction_demolition.htm)
- Fernandes, F. M., Fernandes, A., & Pais, J. (2017). Assessment of the density and moisture content of asphalt mixtures of road pavements. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.119>
- Franklin Associates, Prairie Village, K. (1998). *Characterization of building-related construction and demolition debris in the United States*. Retrieved from [https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/charact\\_bulding\\_related\\_cd.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/charact_bulding_related_cd.pdf)
- González-Fonteboa, B., & Martínez-Abella, F. (2007). Shear strength of recycled concrete beams. *Construction and Building Materials*, 21(4), 887–893. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.018>
- He, Z., Tang, S. W., Zhao, G. S., & Chen, E. (2016). Comparison of three and one dimensional attacks of freeze-thaw and carbonation for concrete samples. *Construction and Building Materials*, 127, 596–606. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.069>
- Heiri, O., Lotter, A. F., & Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 25(1), 101–110. <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>
- Herold, M., & Roberts, D. (2005). Spectral characteristics of asphalt road aging and deterioration: implications for remote-sensing applications. *Applied Optics*, 44(20), 4327–4334. <https://doi.org/10.1364/AO.44.004327>
- Herold, M., Roberts, D., Noronha, V., & Smadi, O. (2008). Imaging spectrometry and asphalt road surveys. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(2), 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2007.07.001>

- Hesami, S., Roshani, H., Hamed, G. H., & Azarhoosh, A. (2013). Evaluate the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 47, 935–941. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.079>
- ICONTEC. (2008a). Calidad de suelo. Determinación de la conductividad eléctrica. Bogota: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Retrieved from [http://ezproxy.uninorte.edu.co:2625/icontec\\_enormas\\_mobile/visor/HTML5.asp](http://ezproxy.uninorte.edu.co:2625/icontec_enormas_mobile/visor/HTML5.asp)
- ICONTEC. (2008b). Calidad de suelo. Determinacion de pH NTC 5264. Bogota: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Retrieved from [http://ezproxy.uninorte.edu.co:2625/icontec\\_enormas\\_mobile/visor/HTML5.asp](http://ezproxy.uninorte.edu.co:2625/icontec_enormas_mobile/visor/HTML5.asp)
- Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificacion (ICONTEC ). (2000). NTC 174 Concretos. Especificaciones De Los Agregados Para Concreto, 20.
- Kasai, Y. (1988). Barriers to the reuse of construction by-products and the use of recycled aggregate in concrete in japan. In *Proceedings of the International Symposium on Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate* (pp. 433–444). Retrieved from Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com)
- Kleijer, A. L., Lasvaux, S., Citherlet, S., & Viviani, M. (2017). Product-specific Life Cycle Assessment of ready mix concrete: Comparison between a recycled and an ordinary concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.004>
- Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., & Sulieman, M. Z. (2012). Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials*, 26(1), 565–573. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.059>
- LacCore, N. L. C. F. (2013). Loss-on-Ignition Standard Operating Procedure. Retrieved March 1, 2017, from <http://lrc.geo.umn.edu/laccore/assets/pdf/sops/loi.pdf>
- Letelier, V., Tarela, E., Muñoz, P., & Moriconi, G. (2016). Assessment of the mechanical properties of a concrete made by reusing both: Brewery spent diatomite and recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 114, 492–498. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.177>
- Limbachiya, M. C., Marrocchino, E., & Koulouris, A. (2007). Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate. *Waste Management*, 27(2), 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.01.005>
- Lu, W., Webster, C., Peng, Y., Chen, X., & Zhang, X. (2017). Estimating and calibrating the amount of building-related construction and demolition waste in urban China. *International Journal of Construction Management*, 17(1), 13–24. <https://doi.org/10.1080/15623599.2016.1166548>
- Medina, C., Zhu, W., Howind, T., Frías, M., & De Sánchez Rojas, M. I. (2015). Effect of the constituents (asphalt, clay materials, floating particles and fines) of construction and

- demolition waste on the properties of recycled concretes. *Construction and Building Materials*, 79, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.070>
- Moreno Rodriguez, N., & Buzon Ojeda, J. (2009). *Control y calidad de materiales para procesos, diseños y construcción de obras civiles*. (Corporacion Universitaria de la Costa - CUC, Ed.) (Primera). Barranquilla: Editorial Universitaria de la Costa - Educosta.
- Moschopedis, S. E., & Speight, J. G. (1978). Influence of metal salts on bitumen oxidation. *Fuel*, 57(4), 235–240. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(78\)90122-9](https://doi.org/10.1016/0016-2361(78)90122-9)
- Murcia-Mascarós, S. (2002). Difracción de Rayos X. In M. Faraldos & C. Goberna (Eds.), *Técnicas de análisis y caracterización de Materiales* (pp. 395–454). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T., & Hisada, M. (2004). Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 965–971. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.008>
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1998). *Tecnología del concreto* (Primera). Mexico D. F.: Editorial Trillas S.A de C.V.
- O'Mahony, M. M., & Milligan, G. W. E. (1991). Recycling of construction waste. *Studies in Environmental Science*, 48(C), 225–231. [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(08\)70406-0](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(08)70406-0)
- Olorunsogo, F. T., & Padayachee, N. (2002). Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. *Cement and Concrete Research*, 32(2), 179–185. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00653-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00653-6)
- Pacheco-Torgal, F., Faria, J., & Jalali, S. (2013). Embodied energy versus operational energy. Showing the shortcomings of the energy performance building directive (EPBD). *Materials Science Forum*, 730, 587–591. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.587>
- Radonjanin, V., Malešev, M., Marinković, S., & Al Malt, A. E. S. (2013). Green recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 1503–1511. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.076>
- Richardson, I. G. (2008). The calcium silicate hydrates. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 137–158. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.005>
- Rodrigues, F., Carvalho, M. T., Evangelista, L., & De Brito, J. (2013). Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *Journal of Cleaner Production*, 52, 438–445. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.023>
- Salehi, M. H., Beni, O. H., Harchegani, H. B., Borujeni, I. E., & Motaghian, H. R. (2011). Refining Soil Organic Matter Determination by Loss-on-Ignition. *Pedosphere*, 21(4), 473–482. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60149-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60149-5)

- Sanchez, E., Fuentes, L., Martinez, G., Rondon, H., Pacheco, C., Yepes, J., ... Cantero, J. (2017). Aprovechamiento de los Agregados Provenientes de la Trituración de Concreto de Demolición de Obras Civiles. In *Congreso Iberoamericano del asfalto* (pp. 1–12). Medellin.
- Sánchez de Guzman, D. (2001). *TECNOLOGIA DEL CONCRETO Y DEL MORTERO*. (Universidad Pontificia Javeriana, Ed.) (Quinta). Santa Fe de Bogota: Bhandar Editores. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=-6eHce4wHNYC>
- Santana Rangel, C., Amario, M., Pepe, M., Yao, Y., Mobasher, B., & Toledo Filho, R. D. (2017). Tension stiffening approach for interface characterization in recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 82, 176–189. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.06.009>
- Santisteban, J. I., Mediavilla, R., López-Pamo, E., Dabrio, C. J., Zapata, M. B. R., García, M. J. G., ... Martínez-Alfaro, P. E. (2004). *Loss on ignition: a qualitative or quantitative method for organic matter and carbonate mineral content in sediments*. *Journal of Paleolimnology* (Vol. 32). Kluwer Academic Publishers. Retrieved from [https://www.academia.edu/4611557/Loss\\_on\\_ignition\\_a\\_qualitative\\_or\\_quantitative\\_method\\_for\\_organic\\_matter\\_and\\_carbonate\\_mineral\\_content\\_in\\_sediments](https://www.academia.edu/4611557/Loss_on_ignition_a_qualitative_or_quantitative_method_for_organic_matter_and_carbonate_mineral_content_in_sediments)
- Sastre de Andres, E., & Ferreira Aparicio, P. (2002). Análisis Térmico. In M. Faraldos & C. Goberna (Eds.), *Tecnicas de analisis y caracterizacion de Materiales* (pp. 247–292). Madrid.
- Silva, R. V, de Brito, J., & Dhir, R. K. (2017). Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review. *Journal of Cleaner Production*, 143, 598–614. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.070>
- Skoog, D. A., & West, D. M. (1986). *Analisis Instrumental* (Segunda). Mexico D. F.: Nueva Editorial Interamericana S. A.
- United States Environmental Protection Agency. (2016). Sustainable Management of Construction and Demolition Materials. Retrieved February 14, 2017, from <https://www.epa.gov/smm/sustainable-management-construction-and-demolition-materials>
- Vieira, D. R., Calmon, J. L., & Coelho, F. Z. (2016). Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 124, 656–666. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125>
- Wang, J. P., Wang, X. J., & Zhang, J. (2013). Evaluating loss-on-ignition method for determinations of soil organic and inorganic carbon in arid soils of northwestern china. *Pedosphere*, 23(5), 593–599. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60052-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60052-1)
- Xu, S., Xiao, F., Amirkhanian, S., & Singh, D. (2017). Moisture characteristics of mixtures with warm mix asphalt technologies: A review. *Construction and Building Materials*, 142, 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.069>

- Ye, Q., Yu, K., & Zhang, Z. (2015). Expansion of ordinary Portland cement paste varied with nano-MgO. *Construction and Building Materials*, 78, 189–193.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.113>
- Zhao, W., & Rotter, S. (2008). The current situation of construction & demolition waste management in china. In *2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, iCBBE 2008* (pp. 4747–4750). <https://doi.org/10.1109/ICBBE.2008.344>
- Zhao, W., Leeftink, R. B., & Rotter, V. S. (2010). Evaluation of the economic feasibility for the recycling of construction and demolition waste in China-The case of Chongqing. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(6), 377–389.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.09.003>